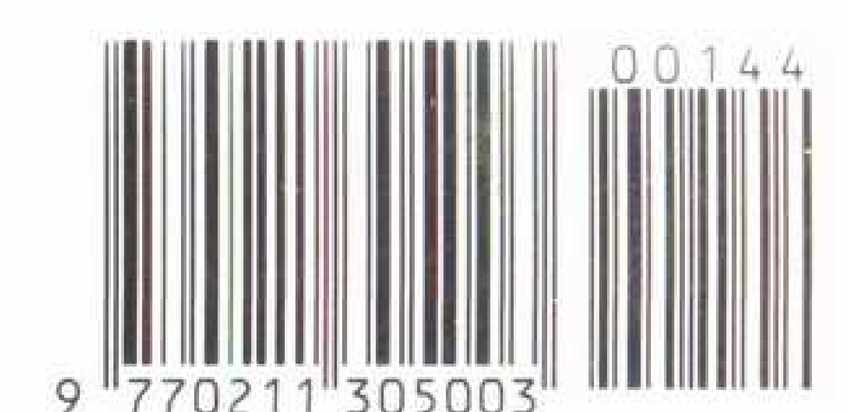
MUNDO CIENTIFICO

LOS ÁTOMOS FRÍOS

LA RECHERCHE, *versión en castellano*

Nº 144 - Mensual 650 Ptas.

LOS ARCHIVOS DEL CLIMA
LA FOTOSÍNTESIS
EL GENOMA HUMANO



LOS ANILLOS DE NEPTUNO

ISSN 0211 - 3058

MUNDO CIENTIFICO

BASE DE DATOS
de uso público y gratuito



Consulte gratuitamente a través de su ordenador personal vía módem *los índices* de *Mundo Científico.* Podrá realizar la consulta por número de revista, fecha de publicación, autor, tema, etc.

Editorial Fontalba ha creado la primera Base de Datos del sector editorial que le permite acceder a los índices de todas sus revistas: *Mundo Científico, Cuadernos de Pedagogía, CLIJ, Cuadernos Jurídicos, Anuario de Psicología, Boletin Agropecuario.* Los índices contienen la referencia de más de 7.000 artículos, fácilmente localizables según diversos criterios de selección. La *Base de Datos de Editorial Fontalba* ofrece también un buzón electrónico con múltiples servicios como petición de números atrasados, gestión de suscripciones, notas para redacción, petición de fotocopias de artículos seleccionados, inserción de publicidad, etc.

Establecer comunicación con el teléfono (93) 207 78 97 mediante el programa de comunicaciones.

Requisitos para la conexión:
- Ordenador personal.
- Módem compatible Hayes.
- Programa de comunicaciones estándar.

Si desea podemos facilitarle gratuitamente un programa específico para conectar directa y fácilmente con nosotros.

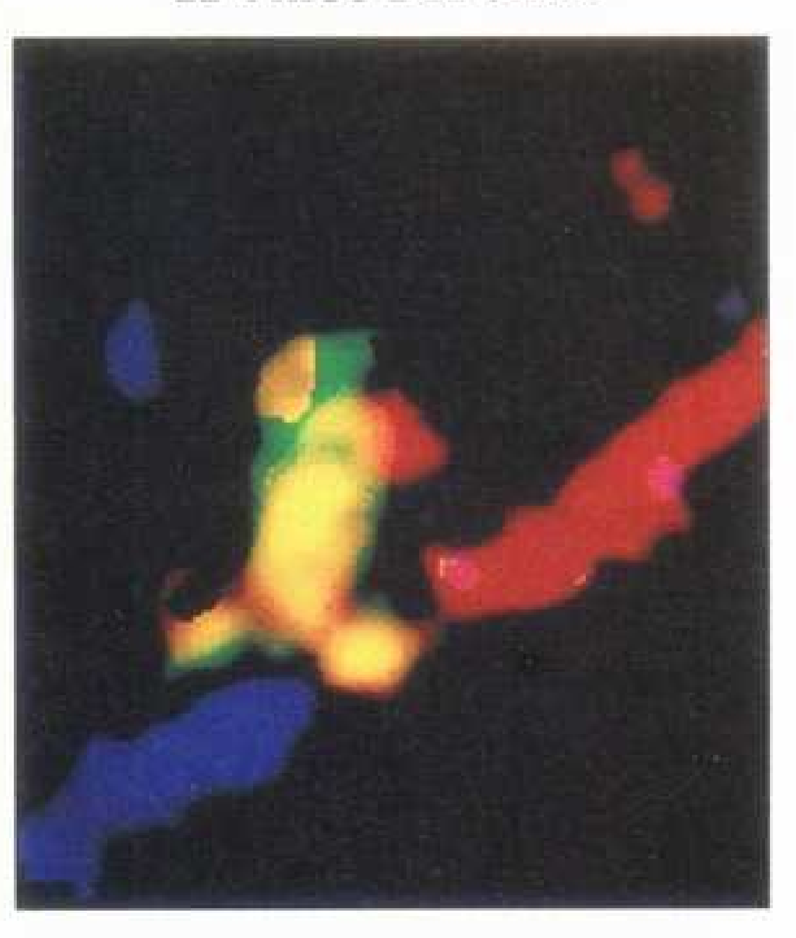
Especificaciones técnicas:
- Velocidad: 1.200 baudios.

Bits de datos 8.
Paridad N.
Bits de stop 1.

EDITORIAL FONTALBA, Valencia 359, 6º 1ª - Tel. (93) 458 55 08 - Fax. (93) 458 66 02 - 08009 Barcelona

MUNDO CIENTIFICO LA RECHERCHE, versión en castellano


¿UN SEGUNDO RECEPTOR PARA EL VIRUS DEL SIDA?


¿VLA 1623, UNA ESTRELLA BEBÉ DE MENOS DE 10 000 AÑOS?


DESCONTAMINAR LOS SUELOS POR MEDIO DE UNA CAMPO ELÉCTRICO

(Portada: Foto NASA/Ciel et Espace)

SUMARIO Nº 144



CAMBIO DE FECHAS DE FIAM'94

Del 27 de setiembre al 2 de octubre próximo se celebrará la Feria Internacional de Iluminación de Valencia, FIAM'94, coincidiendo una vez más con la Feria Internacional del Mueble (FIM). A la convocatoria se suma la Feria Internacional de la Cerámica y Elementos Decorativos (CEVIDER).
La mayoría de los expositores están de acuerdo en que ambas ferias se convoquen juntas, pues esto da una mayor proyección al sector. La valoración general sobre FIAM'93 ha sido positiva.

PREMIO PARA UN ESTUDIO REALIZADO POR RENFE

El XIX Congreso Panamericano de Ferrocarriles, celebrado en Venezuela el pasado mes de enero, ha concedido el primer premio en el área de *trabajos extracontinentales* a un estudio realizado por dos directivos de RENFE, expertos en medio ambiente y ecología. Este trabajo, realizado por Rafael Almodóvar y Pedro Pérez del Campo, lleva por título *La gestión ambiental estratégica de los ferrocarriles españoles*.
El estudio, describe las características y el desarrollo de la política ambiental de RENFE. Una política que se inició con el Plan 92-93 y que estará presente en el Plan Estratégico que esta empresa está diseñando para mejorar su gestión hasta el año 1998.

brevemente

ACUERDO DE COLABORACIÓN ENTRE EL COI E IBM

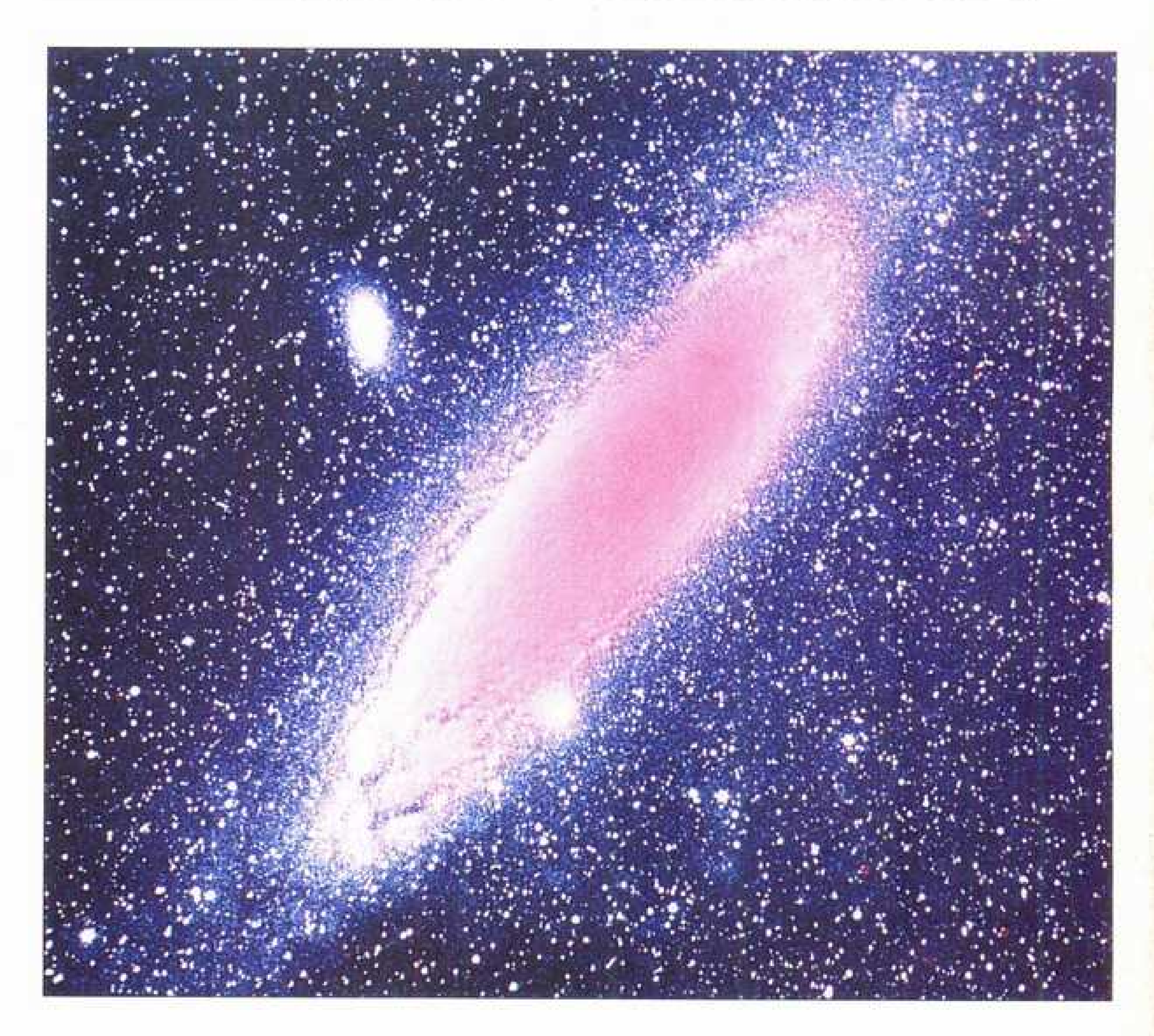
El Comité Olímpico Internacional (COI) e IBM han firmado recientemente un amplio acuerdo de colaboración por el que la compañía informática será el socio en tecnología de la información para los próximos cuatro Juegos Olímpicos, es decir, hasta el año 2000. IBM es proveedor de tecnología de la información en los Juegos Olímpicos desde 1960. Es la primera vez que el COI elige una compañía para que se haga cargo de la tecnología de la información por un largo periodo de tiempo, asumiendo el suministro de la más alta tecnología en productos y servicios. IBM, asimismo, adquirirá la categoría de Top Sponsor del organismo olímpico.

CHERNOBYL, CONTINUACIÓN

Según una reunión de expertos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), el pasado octubre, el número de cánceres de tiroides sigue aumentando de manera alarmante entre los niños de algunas regiones afectadas por las emisiones de Chernóbyl. Desde 1989 se han contabilizado 225 nuevos casos en Bielorrusia y 158 en Ucrania mientras que el número normal no habría tenido que pasar de una decena de casos en total.

ANDRÓMEDA AFECTADA DE CANIBALISMO

Las relaciones entre galaxias no son tiernas, y una galaxia pequeña que pasa demasiado cerca de otra más grande corre el riesgo de acabar engullida. Parece que esta situación se produjo en la galaxia de Andrómeda, también llamada Messier 31.
El telescopio espacial *Hubble* ha proporcionado unas imágenes de su centro que muestran que éste no contiene un solo núcleo sino dos (T. Lauer *et al.*, *Astron. J.*, *106*, 1436, 1993). Es difícil saber lo que pasa verdaderamente en el centro de una galaxia, pues los detalles de la aglomeración de estrellas —o núcleo— que marca este centro no se pueden distinguir por medio de los telescopios en tierra, en el intervalo visible, ya que la turbulencia atmosférica limita a poco menos de un segundo de arco la claridad de las imágenes. Incluso en el caso de Messier 31, que está a menos de dos millones de años



luz, esto no es suficiente. Observaciones en globo, y luego con el telescopio CFH (Canadá-Francia-Hawai) en Hawai, habían demostrado, sin embargo, que este núcleo es alargado y asimétrico, sin que se pudiese saber si se trataba de un efecto de oscurecimiento por el polvo.
Las imágenes obtenidas por el equipo norteamericano del telescopio *Hubble* muestran que Andrómeda posee dos núcleos separados unos seis años luz. Bastante sorprendentemente, es el menos brillante de los dos el que es el verdadero centro de rotación de la galaxia. El núcleo supernumerario es sin duda todo lo que queda de una pequeña galaxia devorada hace mucho tiempo por la gran Andrómeda. ¿Pero, cómo explicar que este núcleo todavía no haya caído al centro dinámico de la galaxia? Según los cálculos de los investigadores, para ello sería necesario que el núcleo de Messier 31 contuviese un agujero negro de algunas decenas de millones de masas solares. Esta hipótesis acaba además de ser apoyada por unas observaciones espectroscópicas efectuadas con el telescopio CFH por investigadores del Observatorio de Lyon. Los telescopios en tierra todavía no han dicho la última palabra... (Foto Cosmos.)

E S Y N O T I C I A S

LA BIODIVERSIDAD EN PROFUNDIDAD

Un equipo anglosajón acaba de derribar un dogma: el de la uniformidad ecológica global de los grandes fondos marinos, un hábitat aparentemente homogéneo a escala planetaria y aislado de la superficie. De forma inesperada, a gran profundidad en el mar existiría una disminución continua de la riqueza y de la diversidad de las especies en función de la latitud, del ecuador a los polos (M.A. Rex *et al., Nature, 365*, 636, 1993). Esta variación es paralela, aunque mucho menos acentudada, a la de las otras especies acuáticas y terrestres, para las que la biodiversidad es máxima cerca del ecuador. Los investigadores han extraído noventa y siete muestras que contienen unos doscientos mil pequeños invertebrados (bivalvos, gasterópodos e isópodos) en los sedimentos blandos entre quinientos y cuatro mil metros de profundidad, en diversos puntos del Atlántico. Las extracciones muestran que el Atlántico Norte y el Mar de Noruega presentan una disminución muy significativa de la riqueza en especies, de las regiones templadas a las zonas subpolares. Unas bandas longitudinales de diversidad equivalente atraviesan el Atlántico Sur, pero con un gradiente menos intenso e importantes variaciones regionales.
Para explicar esta distribución heterogénea a gran escala, se tiene que tener en cuenta la influencia determinante del ecosistema marino superficial sobre el biotopo profundo. Según los investigadores, esta influencia estaría relacionada, en particular, con un importante y rápido transporte vertical de la biomasa producida en la superficie: bastan diez días para que las partículas nutritivas alcancen cuatro mil metros de profundidad. En las zonas boreales, la producción de plancton es más elevada y más variable. La abundancia de la aportación trófica en primavera, que algunas especies bentónicas aprovechan en detrimento de otras, provocaría la proliferación de especies oportunistas que viven en el fondo, y una disminución de la biodiversidad. Además, se podrían intervenir factores paleoclimáticos. Por ejemplo, según los autores, la escasa diversidad observada en el fondo del Mar de Noruega se explicaría en parte por la reciente formación de esta cuenca y por la influencia de las glaciaciones del Cuaternario.

INSTITUTO DANONE. SABER Y HACER SABER



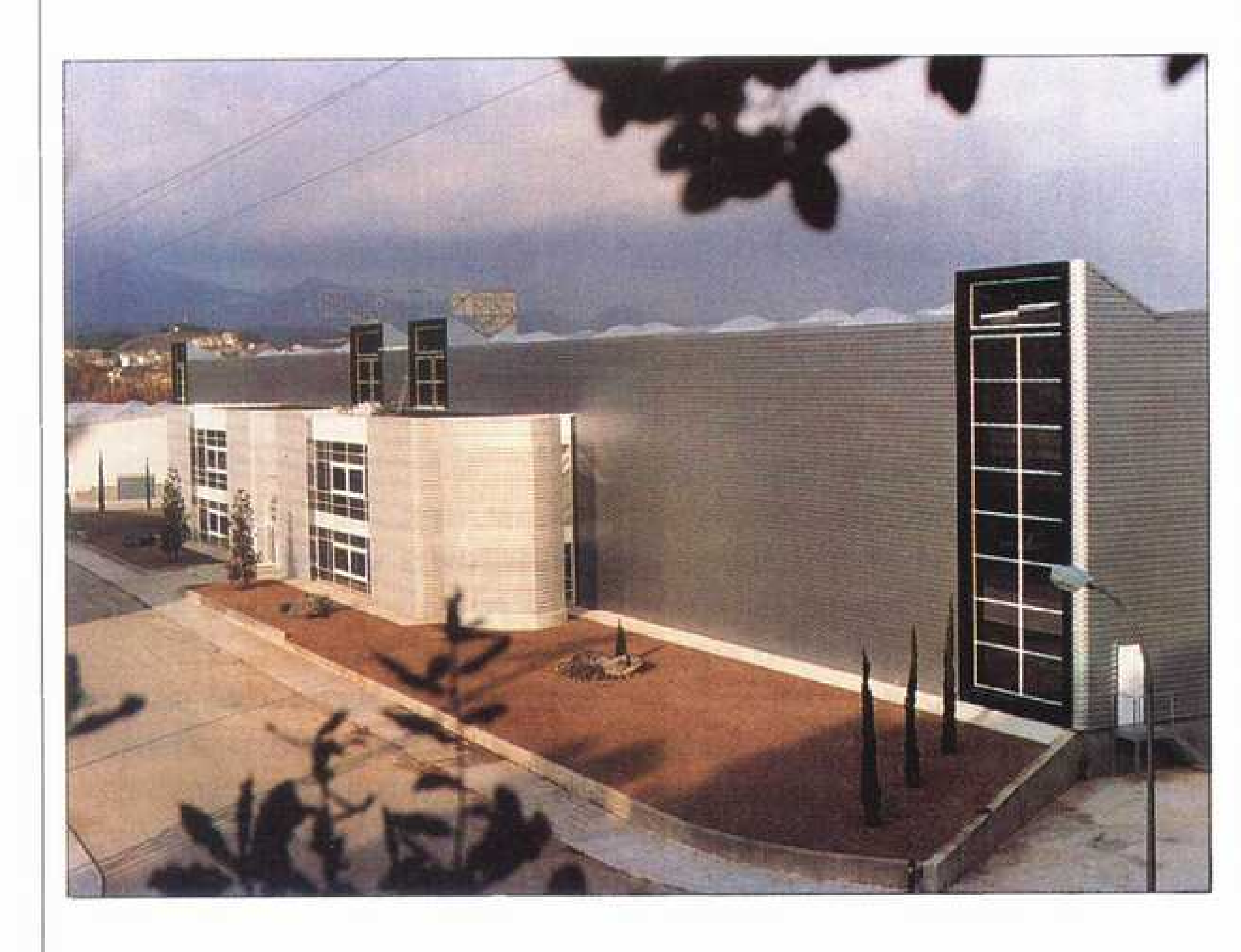
Hasta hace unos años la nutrición era la gran desconocida de las ciencias. Los últimos estudios y la toma de conciencia social de su gran importancia para la salud, imponen la necesidad de fomentar la actividad investigadora sobre una sólida base científica. Por eso empresas como Danone, intentan contribuir al desarrollo de la investigación a través de la creación de un Instituto dedicado al intercambio, a nivel europeo, de los conocimientos científicos en materia de nutrición. Recientemente, 43 expertos se reunieron en Barcelona para celebrar su primera sesión de trabajo. En esta ocasión el tema fue *La alimentación del niño en edad preescolar: sus hábitos alimentarios*. Los especialistas se dividieron en cuatro subcomisiones (consumo, sanidad, hostelería y educación), que reunieron a las personas más representativas del sector con el objeto de presentar unas conclusiones y elevar recomendaciones.

¿HIDRÓGENO NEGRO?

Todavía no se ha terminado de hablar de la materia negra. ¿Esta materia no luminosa que representaría las nueve décimas partes de la masa del Universo, consistiría en partículas elementales? ¿O en estrellas fallidas como lo sugieren los acontecimientos de microlente gravitatoria detectados hace poco? (véase «¿Se levanta por fin el velo de la masa oculta?» en este mismo número). Astrónomos suizos y franceses proponen que, en las galaxias espirales, la materia negra está presente en forma de gas (inlcuso de hielo) de hidrógeno molecular (D. Pfenniger, F. Combes y L. Martinet, *Astron. Astrophys.*, en prensa). Este gas, como las estrellas, estaría distribuido en un disco, que se extendería mucho más allá del disco estelar. Las moléculas de hidrógeno situadas lejos del centro de la galaxia, allí donde casi no hay estrellas, serían prácticamente invisibles. En efecto, en estas regiones periféricas no hay estrellas para calentarlas y su temperatura sería la de la radiación cósmica de fondo (2,7 K). Si, además, estas moléculas están distribuidas según una estructura fractal, su masa total puede ser considerable: ¡la definición misma de materia negra!
Sin embargo, la formación y la estabilidad de una estructura de este tipo plantean algunos problemas. En el marco del modelo considerado por los investigadores, es la rotación de la galaxia la que estabiliza el edificio a gran escala; por tanto la idea es válida sobre todo para las galaxias espirales. Además, el modelo prevé que las aglomeraciones más pequeñas de hidrógeno tendrían que ser un millón de veces más densas que el medio interestelar, y tener un tamaño una treintena de veces el de la órbita de la Tierra. Incesantes colisiones impedirían que estos objetos se agregasen en estrellas. ¡El problema reside en saber cómo someter a prueba esta idea seductora ya que, por naturaleza, la materia negra es invisible!

ENTRADA DEL GRUPO ESPAÑOL COPERCO EN EL MERCADO PORTUGUÉS

La firma española Coperco ha establecido un acuerdo de colaboración con la empresa holandesa Remco en Portugal para la construcción de naves industriales en kit.
La economía y agilidad del sistema de construcción de naves industriales en kit de Coperco, reside en la centralización de los procesos de desarrollo, gestión, producción y montaje. Con los datos aportados por el cliente, el servicio técnico realiza en pocas horas, el cálculo de estructuras y diseño del proyecto. Gracias al sistema integrado de producción, se controla la totalidad del proceso, desde el concepto y diseño hasta los últimos detalles, simplificando al máximo la gestión. Esto se traduce en un ahorro de tiempo y dinero para el cliente. Asimismo, Coperco lleva a pie de obra toda la producción para garantizar la entrega en óptimas condiciones y minimizar riesgos.
Para facilitar la máxima rapidez de entrega al cliente, la empresa española ha establecido una red a nivel europeo de concesionarios para su montaje.

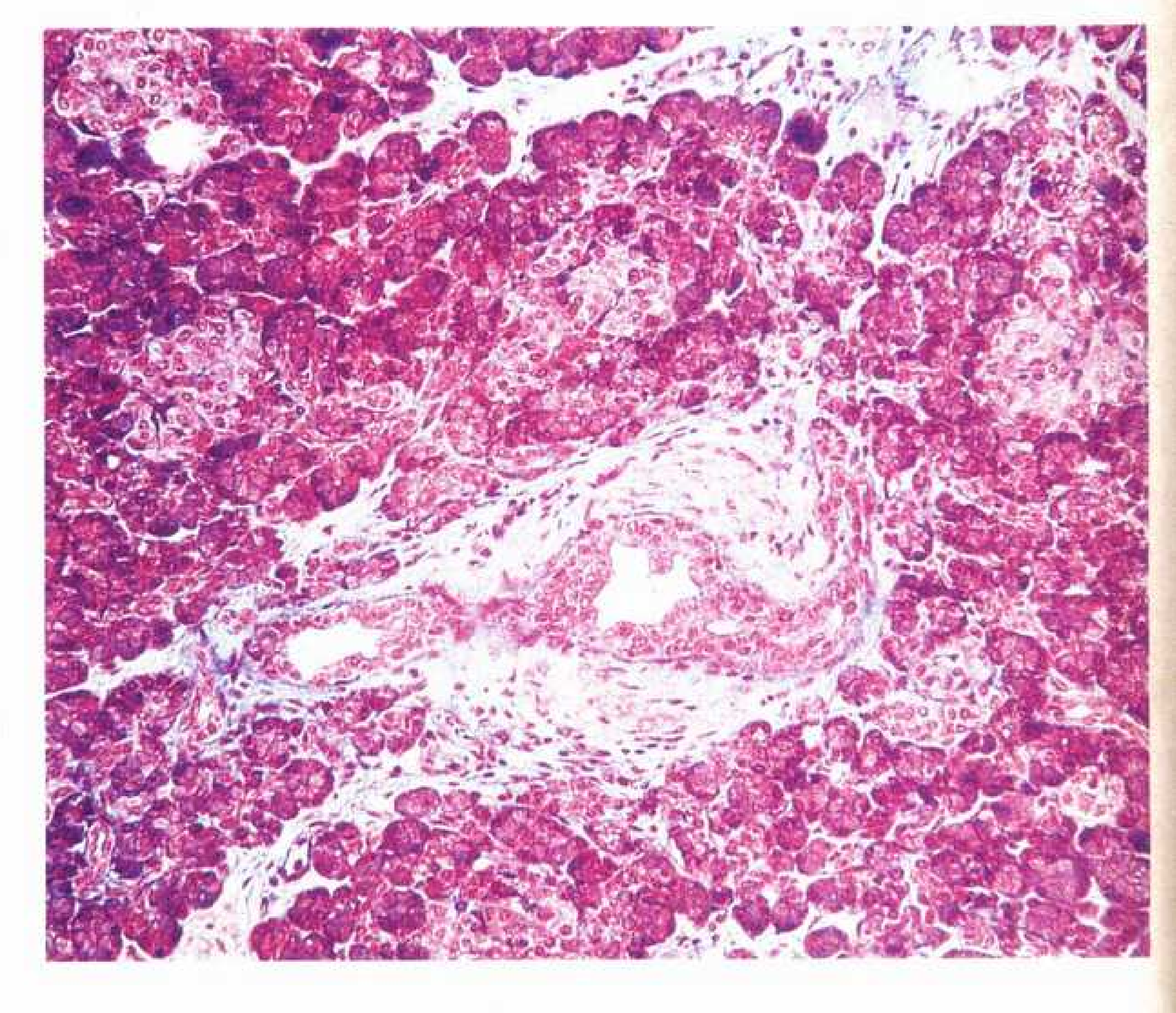


CITEC'94

Los próximos días 15 y 16 de marzo, tendrá lugar en Madrid Citec'94 (III Conferencia Internacional sobre Empresa y Tecnología de la Información).
Este año participarán más de 200 responsables de informática y comunicaciones para intercambiar conocimientos y experiencias sobre el empleo de las tecnologías de la información, como elemento dinamizador de la actividad económica de la empresa y factor clave en la mejora de la competitividad.
Este año se ha potenciado el carácter internacional de la Conferencia con la asistencia de expertos extranjeros: John Cross (BP OIL), Paul Bender, Paul Tanner (X Open), Anders Vinberg (CA), Bernard Guidon (HP), Roberto Masiero (IDC). La conferencia inaugural estará a cargo de Michael Earl, de la London Business School. Se ha establecido también un acuerdo con Theseus, escuela de negocios en Niza, que permitirá contar con Claudio Ciborra y Charles Wiseman, dos profesores de reconocido prestigio entre las multinacionales europeas.

DIABETES: EL BLANCO NÚMERO UNO

Los procesos que, en la diabetes insulino-dependiente, conducen a la destrucción de las células del páncreas encargadas de producir la insulina son todavía poco conocidos. Sin embargo, un enzima concreto, el ácido glutámico decarboxilasa (GAD) podría desempeñar un papel clave en el desarrollo de esta enfermedad autoinmune. Esto es lo que sugieren dos estudios realizados en el ratón por investigadores de la universidad de California en Los Ángeles y de la universidad de Stanford (D.L. Kaufman *et al.*, *Nature*, 336, 69, 1993; R. Tisch *et al.*, *Nature*, 336, 72, 1993). Desde el principio de los años ochenta, se sabe que la destrucción de las células beta del páncreas (véase la fotografía), que producen la insulina, es desencadenada por los linfocitos T del sistema inmunitario. Pero no se conocían las moléculas blanco de este ataque. Se consideraba que la GAD, un enzima importante para las células beta, era un posible blanco ya que en el 80 al 90 % de los pacientes aparecen anticuerpos dirigidos contra este enzima desde el principio de la enfermedad.
Para verificar esta hipótesis, los dos grupos de investigadores han analizado la reactividad de los linfocitos T frente a diferentes moléculas en ratones NOD (*Non Obese Diabetic*), un excelente modelo animal de la diabetes insulino-dependiente. De este modo han demostrado que las células T son activas contra la GAD, desde el primer estadio de la enfermedad. Esta reactividad de las células T, dirigida de entrada únicamente contra la GAD, se extiende durante las semanas siguientes a otras moléculas producidas por las células beta. Además, la inyección de GAD a animales jóvenes, que todavía no han desarrollado la enfermedad, disminuye, por un fenómeno de tolerancia, la reacción inmunitaria y bloquea el



desarrollo ulterior de la diabetes. La ácido glutámico decarboxilasa se revela así una de las primeras moléculas blanco de la reacción autoinmune. Un resultado que sin duda permitirá comprender mejor algunas diabetes humanas. No obstante, se tiene que ser muy prudente respecto a las esperanzas terapéuticas que tales estudios podrían originar, ya que los procesos que conducen a la diabetes en el hombre son más complejos que en el ratón. (Foto Inserm.)

EL VIRUS DE LOS CUATRO ESTADOS

Desde mayo de 1993 ha aparecido en el sudoeste de Estados Unidos un misterioso síndrome de fatiga pulmonar (*Adult Respiratory Distress Syndrome* o ARDS). El pasado noviembre, se contaban cuarenta y dos casos, principalmente de jóvenes adultos navajos en cuatro estados (Nuevo México, Arizona, Colorado y Utah), con una mortalidad del orden del 75 %. Investigadores del Center for Disease Control and Prevention (CDC) han logrado identificar el agente patógeno responsable —un virus, así como su huésped natural— un pequeño roedor. El síndrome se manifiesta al principio por fiebre y dolores musculares, y luego evoluciona hacia edemas pulmonares y una insuficiencia respiratoria. El virus patógeno, del género de los hantavirus, llamado primero «virus de los cuatro estados» y luego *Pulmonary Syndrome Hantavirus*, se ha podido identificar por medio de una reacción cruzada con anticuerpos antihantavirus ya conocidos. La confirmación de su naturaleza se ha logrado amplificando su genoma por PCR *(Polymerase Chain Reaction)*, y por medio de un estudio filogénico. Se trata con seguridad de una nueva cepa de hantavirus. Hasta ahora ninguna cepa conocida provocaba síndromes respiratorios; sólo se conocían tres de ellas (Hantaan, Seúl y Belgrado) que provocaban un síndrome renal y una fiebre hemorrágica. La principal reserva natural de esta nueva cepa es un pequeño roedor (*Peromyscus maniculatus*), que no parece afectado por el virus. Lo transmitiría al hombre a través de sus excrementos, y no parece haber transmisión entre humanos. Como este ratón está ampliamente extendido por numerosas regiones de Estados Unidos, se espera que aparezcan nuevos casos en estas zonas. El CDC ha recibido la autorización de la *Food and Drug Administration* para distribuir un agente antivírico, la ribavirina, eficaz contra algunas cepas de hantavirus, como prevención en las zonas de riesgo. Todavía falta verificar muchas hipótesis sobre el origen del virus, su transmisión repentina al hombre y su distribución.

¿DE DÓNDE PROCEDEN LOS ROEDORES SURAMERICANOS?

La formación del Océano Atlántico, durante la era Secundaria, hace unos 125 millones de años, provocó el aislamiento de América del Sur del resto de los continentes. Y su conexión con América del Norte data de menos de 5 millones de años. Sin embargo, gracias a fósiles datados en 25 millones de años, se sabe que los roedores, originarios del viejo continente, se introdujeron en América del Sur en una época en la que este continente estaba probablemente aislado. ¿Pero, de dónde venían estos animales, de América del Norte o de África? ¿Y cómo pudieron llegar a un continente aislado por el mar? Un nuevo yacimiento de fósiles de mamíferos, descubierto en los Andes chilenos y estudiado por un equipo de paleontólogos norteamericanos y chilenos, indica un origen africano de los roedores sudamericanos (A.R. Wyss *et al.*, *Nature, 365*, 434, 1993). Este yacimiento comprende más de cuatrocientos especímenes, entre ellos varios roedores, conservados en sedimentos acumulados al pie de volcanes. Los depósitos se han datado en 34 millones de años (límite Eoceno-Oligoceno), por medio de radioisótopos: se trata, por tanto, de los más antiguos fósiles de roedores conocidos en este continente. Para encontrar el origen geográfico de estos animales, los paleontólogos se basan en el estudio de la dentición, y más exactamente en la forma de los molares de las mandíbulas superiores. En efecto, estos dientes están provistos de cinco crestas, como los dientes de los roedores africanos del Terciario; en cambio, los molares de las especies que existían en América del Norte sólo poseían cuatro crestas. Falta comprender cómo pudieron atravesar el Atlántico estos roedores... ¿Se tiene que hacer resurgir, a falta de respuestas de los investigadores, la idea de animalitos aferrados a balsas de ramaje, derivando al albur de las corrientes, a la conquista del Nuevo Mundo? (Foto Jacana.)



brevemente

¿OTRO FOTORRECEPTOR VEGETAL?

En las plantas, el fitocromo es un fotorreceptor, sensible a la luz roja, que determina entre otras cosas la germinación de las semillas y el periodo de la floración. Otro sistema fotorreceptor, sensible a la luz azul, interviene, en especial, en el fototropismo vegetal y en la abertura de los estomas de las hojas. Sin embargo, falta identificarlo. En este sentido, dos biólogos de la universidad de Filadelfia acaban de dar un paso importante en este sentido (M. Ahmad y A.R. Cashmore,* Nature, *366, 162, 1993). Estos investigadores han aislado, en la planta modelo* Arabidopsis thaliana, *varias formas mutantes de un gen (HY4) que hace que esta planta sea insensible a la luz azul. La proteína correspondiente (hy4) podría ser el fotorreceptor desconocido o uno de sus elementos. Una pista a seguir...

SANDOZ FIRMA UN ACUERDO CON AJINOMOTO

Sandoz Pharma, de Basilea, ha firmado un contrato con la empresa Ajinomoto, de Tokyo, para el desarrollo y marketing de un nuevo medicamento oral antidiabético, el A-4166. Este medicamento, que actualmente está sometido a estudios clínicos, está diseñado para tratar la diabetes mellitus no insulinodependiente (DMNID), mediante la estimulación en la producción de insulina. Los estudios sugieren que el A-4166 es rápidamente absorbido y reduce los niveles de glucosa en la sangre después de las comidas. Su duración de acción es corta, siendo el riesgo de hipoglucemia, aparentemente menor que con sufonilureas, que es tratamiento más habitual cuando fallan las medidas dietéticas.

UNA NUEVA TÉCNICA DE COMPRESIÓN DE IMÁGENES

La trasmisión de los millones de elementos binarios por segundo de una imagen de televisión digital sobrepasa ampliamente las posibilidades actuales de trasmisión y almacenamiento. La televisión del futuro, así como otros sectores en los que se manipulan volúmenes importantes de información (por ejemplo la obtención de imágenes por satélite), requieren la puesta a punto de técnicas de compresión de datos. Éste es el objeto de los trabajos del equipo de Y. Dologlou, del laboratorio de señales y sistemas de la Escuela superior de electricidad (CNRS-ESE), en Gif-sur-Yvette, Francia, que propone un nuevo método para codificar una imagen en forma comprimida. Este método, llamado análisis de componente residual binaria, se basa en una modelización vectorial de la imagen. La primera componente es una representación lineal clásica, que se sabe comprimir fuertemente. La segunda (componente residual) es susceptible de ser representada por un solo bit de cuantificación por punto de la imagen; esta segunda componente se puede someter entonces a una compresión suplementaria. Desde luego, se dispone actualmente de diferentes técnicas de compresión de imágenes: JPEG (*Joint Picture Expect Group*) para las imágens fijas y MPEG (*Moving Picture Expect Group*) para las imágenes animadas. Pero el enfoque propuesto por los investigadores del ESE parece conducir a una mejora notable de los rendimientos. Por ejemplo, con unas tasas de compresión de 9 y de 17 (comparables a las de las técnicas JPEG), la calidad de la señal y la relación señal ruido son superiores a las obtenidas con JPEG. En cuanto al deterioro de la calidad, cuando aumenta la tasa de compresión, es menor que en el caso de JPEG. Teniendo en cuenta estos buenos resultados, el equipo de Gif-sur-Yvette, en colaboración con el laboratorio Informática, Señales y Sistemas de Sophia-Antipolis y con el Instituto de investigación en informática y sistemas Aleatorios (CNRS-INRIA) de la universidad de Rennes I, en Francia, prosigue la evaluación de su método para las imágenes fijas, y piensa generalizarlo al tratamiento de secuencias de imágenes. El campo de aplicación de las técnicas de compresión de imágenes no hace más que ampliarse. Se están realizando numerosos trabajos tanto a nivel de la normalización como del desarrollo algorítmico. En este contexto, el análisis de componente residual binaria es un buen compromiso entre complejidad y calidad de restitución de la imagen.

ALTAVOCES SIN MEMBRANA

Desde hace casi un siglo, el altavoz de membrana vibrante es el sistema dominante de difusión sonora. Durante la última edición del Mercado internacional de tecnologías avanzadas (SITEF 93), que tuvo lugar en Toulouse, Francia, el pasado otoño, la empresa Stamp de esta ciudad presentó una célula acústica basada en un principio fundamentalmente distinto, denominada Plansonor. En un altavoz tradicional, una bobina de hilo conductor colocada en el campo de un imán se desplaza por efecto de la fuerza de Laplace cuando es recorrida por la señal eléctrica procedente del amplificador. Su extremo es



solidario de una membrana que trasmite estos desplazamientos al aire ambiente. Pese a decenios de mejoras, este sistema presenta inevitables límites mecánicos que perturban la fidelidad de reproducción. La pieza central de la célula Plansonor no se desplaza. Transmite el mensaje sonoro por lo que sus inventores llaman «difusión acústica». Se trataría, siempre según ellos, de la propagación de la agitación de las moléculas de esta piececita a las del aire ambiente. Esta última es un simple paralelepípedo de poliestireno extrusionado, ya que este material no conductor, ligero y escasamente elástico, es el que da actualmente los mejores resultados. Este volumen está rodeado por un doble enrollamiento de hilos conductores colocados directamente en contacto con él. El conjunto está situado en el entrehierro de un imán. La célula completa pesa un kilogramo y medio, y tiene el volumen de un libro. Los dos enrollamientos son recorridos por la corriente en sentidos inversos, lo que anula su desplazamiento en el campo magnético, y hace innecesaria toda suspensión. El sistema utiliza una componente lateral de la fuerza de Laplace, generalmente ignorada, e incluso compensada en los altavoces. Por efecto de esta fuerza, los enrollamientos ejercen micropresiones sobre el volumen de estireno, que las difunde al aire. La célula no presenta ninguna resonancia, difunde en todas direcciones y reproduce muy fielmente la totalidad del espectro sonoro. Sin embargo, este modo de funcionamiento no vibratorio sólo permite transmitir unas energías limitadas. Por tanto, hay que multiplicar las células si se quiere obtener un volumen sonoro importante. Pero según su inventor, la claridad de la reproducción hace inútil esta carrera por el volumen. Estas células están destinadas tanto a particulares como a fabricantes a los que les interese integrarlas en paneles acústicos. Su calidad sonora —y su precio (unas veinte mil pesetas)— hacen de ellas un material de alta gama, pero Stamp también piensa en la sonorización de espacios públicos poco ruidosos. (Foto Stamp.)

brevemente

¿FULERENOS CONTRA EL VIRUS DEL SIDA?

Al final de trabajos realizados independientemente, dos equipos de investigación norteamericanos, uno de la universidad de California, en San Francisco (UCSF), y el otro de la universidad Emory, en Atlanta, han emitido una hipótesis según la cual una molécula derivada del carbono 60, cuya configuración se ha establecido por modelización en ordenador, podría ser activa contra el virus responsable del sida. Esta molécula bloquearía el lugar activo de la proteasa del virus. A petición de estos equipos, el grupo del químico F. Wudl, de la universidad de California en

INDUSTRIA

Santa Bárbara (UCSB) ha realizado la síntesis del derivado en cuestión el di(fenetilaminosuccinato)C60 (R.F. Schinazi et al., **Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 37(8),** *1707, 1993; S.H. Friedman* et al., **J. Am. Chem. Soc., 115,** *6510, 1993). Los experimentos* in vitro *realizados por los dos equipos habrían permitido verificar que este derivado detendría la reproducción del virus. También sería activo contra las células infectadas resistentes al AZT. Evidentemente todavía es demasiado pronto para decir si estas moléculas servirán un día con fines terapéuticos, pero no se puede ignorar esta pista.*

ACCESO DIGITAL DE 30 CANALES

El Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Comunicaciones ha homologado el sistema de acceso digital de 30 canales para centralitas de mediana y gran capacidad de Alcatel Ibertel. Esta mejora tecnológica permite establecer hasta 30 comunicaciones simultáneas a través de un mismo par de hilos, al tiempo que posibilita el acceso directo a las extensiones de los usuarios internos.
Con ello, se consigue una mejor distribución de las llamadas entrantes, atención personalizada y reducción de los tiempos de espera.
A estas ventajas hay que sumar una importante reducción en los ahorro costes: se racionaliza el uso del tiempo de las operadoras, evitándose un importante número de maniobras telefónicas de transferencias, localizaciones, etc.
Además, las centralitas telefónicas digitales de Alcatel proporcionan un servicio de tarifas individualizada que permite al usuario conocer el valor de la llamada.



PERKINS LANZA MOTORES DIESEL ECOLÓGICOS

Los nuevos motores Perkins *Phaser* y *Eagle* utilizan la tecnología más avanzada para satisfacer las regulaciones comunitarias europeas anticontaminación, *Euro 2*, que entrarán en vigor en 1996.
La gama *Phaser* para camiones ligeros y semipesados se inició hace 7 años y enseguida captó la atención de los transportistas por su calidad, ahorro, potencia y resistencia a las averías. Con una cilindrada de 4 a 6 litros, desarrollan una potencia de 106 a 210 CV. Disponen de *intercooler* e incorporan el nuevo sistema de combustión *Fastran*, con objeto de cumplir las rigurosas normas norteamericanas sobre circulación de vehículos diesel. Los pistones, de diseño especial, tienen unos rebajes en la cabeza que aumentan la turbulencia y promueven una mezcla de aire-combustible más rápida y completa consiguiendo así una combustión perfecta, con menor emisión de humos, disminuyendo a la vez el ruido y la fatiga mecánica.



Con los nuevos avances tecnológicos, los motores *Phaser* se encuentran dentro de los límites exigidos por las normas. Cuando la nueva legislación comunitaria exija un máximo de 8 gramos de óxidos de nitrógeno por cada kilovatio de potencia, estos motores sólo emiten 5,75 gramos. Respecto al índice de partículas no quemadas, (responsables de los conocidos humos blancos y negros, así como de los olores habituales del diesel), la normativa europea marcará un nivel tope de 0,36 gramos por kilovatio, pero los *Phaser* ya han logrado reducirlo a 0,22. Estos niveles les caracterizan como uno de los motores más ecológicos actualmente en producción.

UNA AYUDA INVISIBLE PARA LOS DEFICIENTES AUDITIVOS

Además de sus insuficiencias en el plano acústico, la mayoría de las prótesis auditivas pecan por su falta de estética. Dos defectos que ha querido remediar el grupo Philips audiología, iniciando la comercialización de una ayuda auditiva completamente invisible.
Es la primera prótesis situada tan cerca del tímpano, a unos tres milímetros de éste.
El aparato se presenta en forma de un pequeño cilindro que mide cinco milímetros de diámetro y un centímetro de altura.
Debido a su emplazamiento, la cavidad residual, es decir, el volumen que queda entre la prótesis auditiva y el tímpano queda considerablemente reducida, lo que presenta múltiples ventajas: una atenuación de los efectos de resonancia, producidos por ejemplo por la masticación, y una reducción de las vibraciones transmitidas a través del pabellón y del conducto cartilaginoso. Además, el sonido es más puro y parece más natural, desprovisto de distorsión, con una mejora sustancial de la presión acústica y de la inteligibilidad. Finalmente, no se producen los pitidos o «efectos Larsen» que pueden aparecer cuando se acerca un reflector acústico (un aparato telefónico por ejemplo) al pabellón de la oreja. La implantación requiere previamente un examen otorrinológico completo, con la toma de

(pasa a la página siguiente)

(viene de la página anterior)
un molde del conducto auditivo hasta el tímpano, por medio de una masilla líquida a la silicona adecuada. Un solo punto oscuro: de la totalidad de las personas que requieren ayuda auditiva, un 30 % de ellas posee un canal demasiado estrecho o demasiado curvado, o tiene contraindicaciones médicas que impiden su implantación.

MIRADA AL FONDO DEL OJO

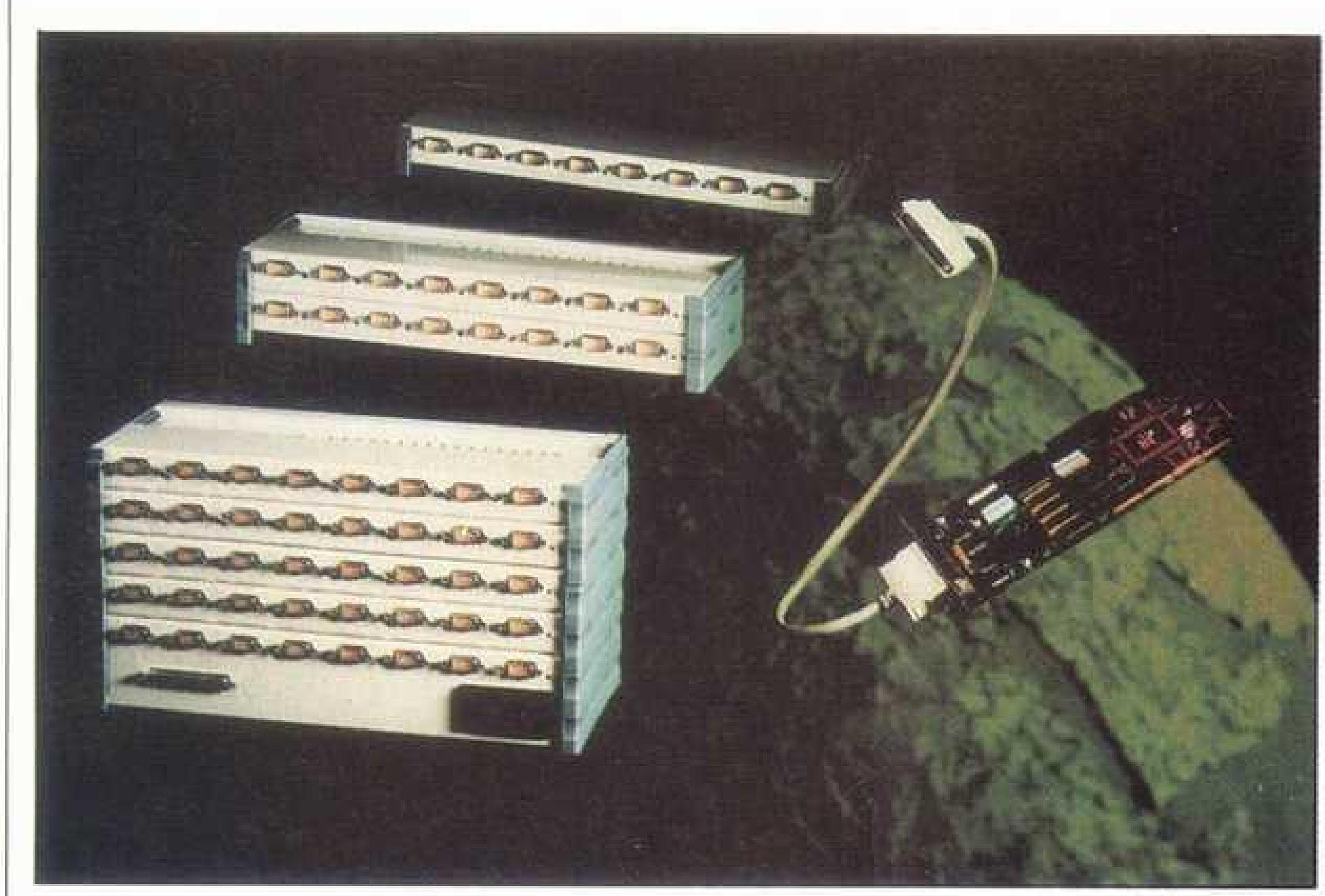
Al principio de este año, la sociedad francesa I-TECH tendría que terminar la puesta a punto de un prototipo de una nueva generación de oftalmoscopios láser de barrido, destinados al análisis de la función retiniana. Pero las utilizaciones de las técnicas que intervienen en este tipo de aparatos van mucho más allá, ya que conciernen tanto al sector militar como al audiovisual y a los mundos virtuales. Su desarrollo se basa en los trabajos realizados por el norteamericano R. Webbs, del Eye Research Center de Boston, y por el francés J. Simon, del Instituto de Óptica de Orsay, en la mitad de los años ochenta. El fundamento es relativamente sencillo: un haz láser de baja intensidad barre la retina, a la manera de una pantalla de televisión; este haz incidente, cuya intensidad está modulada, proyecta imágenes sobre el fondo del ojo; una vez reflejado en la retina, contiene la «huella» de las estructuras anatómicas de ésta. Entonces la huella se observa y se transforma en una imagen electrónica por medio de un sistema óptico confocal y un fotomultiplicador. Esta técnica ya ha permitido que el laboratorio de biofísica sensorial del hospital Lariboisière de París establezca un cierto número de resultados relativos a la función retiniana y a los fenómenos de la visión. Por ejemplo, se ha podido verificar que el ojo sólo analiza con precisión la imagen en una zona limitada de la retina (de alrededor de 10º de ángulo visual), la «mácula». Esta última se desplaza respecto al blanco (la imagen proyectada) a saltos sucesivos y rápidos, lo que permite que luego el cerebro reconstruya la imagen completa. Las células del entorno macular sólo intervendrían para captar las modificaciones rápidas en la periferia de la imagen. El dispositivo experimental instalado en el servicio de biofísica sensorial de Y. Grall de Lariboisière se utiliza en todo tipo de aplicaciones terapéuticas, desde el diagnóstico hasta la recuperación funcional después de una operación de la retina. Por su parte, unos médicos norteamericanos de Boston estudian las reacciones de autistas a los estímulos visuales, con objeto de orientar su terapéutica. La misma técnica también se experimenta en algunos dispositivos de ayuda al pilotaje de aviones de combate. Además, pronto se tendría que franquear una nueva etapa gracias a la asociación de tres haces láser, cuyas longitudes de onda se habrán elegido convenientemente para reconstruir sobre la retina una imagen en color. Se apunta en este caso a la recepción directa de imágenes en la retina, en vez de a su proyección en una pantalla. Finalmente, los sectores de la infografía y de los mundos virtuales están directamente interesados por los resultados sobre la función retiniana mencionados más arriba: bastaría con calcular en tiempo real solamente una parte mínima de las imágenes presentadas al observador provisto de gafas estereoscópicas, según la posición de sus máculas respecto a las imágenes que observa, lo que contribuiría a reducir muy fuertemente las necesidades de compresión de datos. ¿Se recibirá en el futuro la televisión directamente en la retina?

brevemente

EL SOL EN LA ARQUITECTURA

¿Tiene la electricidad fotovoltaica la menor posibilidad de ser tomada en serio un día, como complemento de otras formas de energía, en países tan poco soleados como Alemania o tan reticentes como Francia? En todo caso, ésta es la apuestá de la sociedad alemana Schüco (diseñadora de perfiles aluminio-vidrio), que presentaba en el Salón Batimat, al final del pasado año, su fachada fotovoltaica que equipa desde hace poco uno de los inmuebles de su sede social. Ya no se trata de paneles fotovoltaicos instalados de forma más o menos estética en techos de inmuebles, sino de una verdadera integración de las células fotovoltaicas en la fachada. En el caso de la sede social de Schüco, se trata de 155 metros cuadrados de fachada (fachada oscura, a la derecha en la fotografía), que integran células de silicio amorfo, monocristalino o policristalino (con un rendimiento que varía entre el 4 y el 14 %), que alimentan eléctricamente tres pisos de uno de los inmuebles (iluminación e infraestructura informática), es decir, mil metros cuadrados de oficinas: en promedio se tiene que calcular un metro cuadrado de fachada fotovoltaica para alimentar un metro cuadrado de oficina, se dice en Schüco. El sobrecoste de estas fachadas es desde luego considerable, pero no afecta más que a una parte de las fachadas de un inmueble así equipado. Después de Batimat están en estudio nuevos proyectos, varios de ellos para organismos suizos, y también dos para empresas francesas, y uno para el edificio administrativo de una de las grandes empresas públicas francesas. ¿Ganará su apuesta Schüco? (Foto Schüco.)

INFORMÁTICA



NUEVO SISTEMA DE COMUNICACIONES MULTIUSUARIO PARA ORDENADORES PERSONALES

Mediante el empleo de un sistema de comunicaciones perfeccionado en el Reino Unido, todo ordenador compatible con un ordenador personal podrá aceptar hasta 64 puertos en serie con capacidad individual de transmisión o recepción simultánea de datos a 115,2 Kbit/seg. El sistema Superport de la firma *Tecnology Concepts*, utiliza la tecnología RISC (ordenador con conjunto de instrucciones reducidas) para proporcionar la capacidad necesaria de tratamiento de datos a gran velocidad.
Se conecta al bus ISA/EISA del ordenador central una ficha de controlador, utilizándose un procesador RISC de 20 Mhz y 17 millones de instrucciones por segundo con 128 o 640 Kbytes de RAM para los programas de control que se trasvasan del ordenador central. Un bus de alta velocidad conecta la ficha del controlador a una unidad de entrada/salida de una base externa.
La unidad de entrada/salida tiene un solo suministro electrónico y ocho puertos en serie. Mediante una sencilla acción de conexión por resorte, pueden apilarse fácilmente encima de la unidad básica otras siete capas de ocho puertos cada una para obtener 64 puertos en serie. El Superport ofrece excelente adaptabilidad y velocidad para el desarrollo de sistemas de comunicaciones de alto rendimiento. La compañía ofrece software de gestión de periféricos para la mayor parte de los sitemas operacionales, incluyendo UNIX, InixWare y Multiuser DOS.

LECTOR DE CD-ROM DE DOBLE VELOCIDAD

Pioneer lanzó al mercado el pasado mes de febrero el CD-ROM modelo DRM-602X, que reemplaza al anterior DRM-600-A, también de 6 discos.



Este lector multidisco, además de doblar la velocidad sostenida de transferencia de datos a 307 Kb/seg, y reducir el tiempo de acceso a 300 milisegundos, dispone de un buffer de 256 Kb y mejora el tiempo de intercambio de discos.
Este dispositivo, de interfase SCSI-2, reconoce una gran variedad de estándares de CD-ROM, tales como el CD Audio, ISO9660, High Sierra, Rock Ridge, CD-ROM XA (modo 2, forma 1 y 2), y el CD-R. Además de cumplir las especificaciones MPC, el DRM-602X. también soporta la lectura Multisesión.
Con este nuevo producto, el DRM-604X, ya existente en el mercado y con una velocidad de transferencia de 614 Kb/seg, y el modelo DRM-1804X, que aparecerá en abril, con capacidad para 18 discos,·Pioneer confirma su liderazgo en la fabricación de cambiadores de CD-ROM.

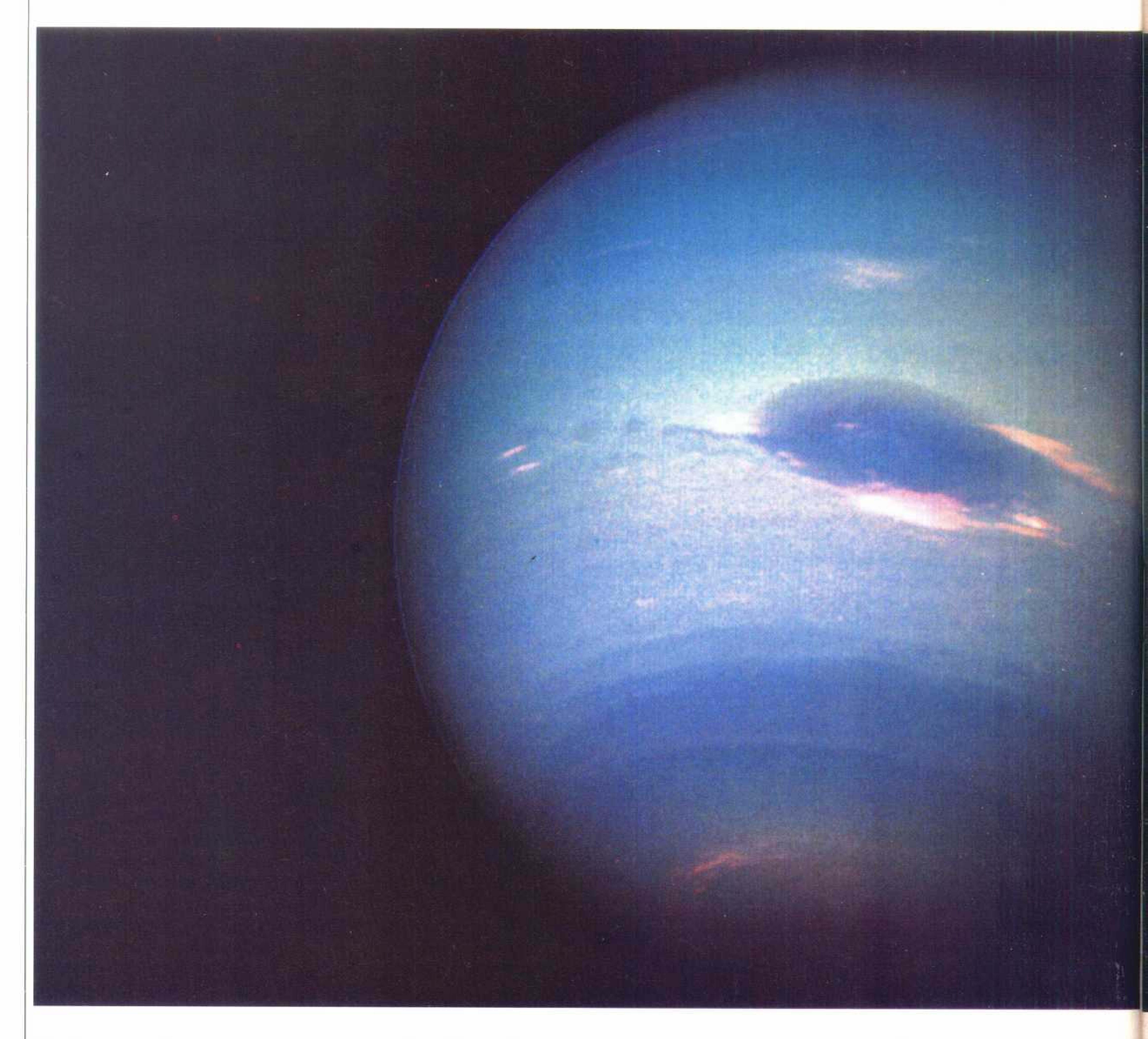
NUEVO ORDENADOR CON TECNOLOGÍA BUS LOCAL

La empresa Epson anunciaba recientemente la comercialización del nuevo ordenador *ActionDesk* 4000 compacto, de bajo coste y modular de sobremesa, con arquitectura Local Bus integrada en placa base de vídeo y disco duro. Por sus excepcionales características técnicas se considera una máquina flexible y expansible.
El equipo se presenta bajo dos configuraciones basadas en los procesadores 486DX/33 y 486DX2/50. Los equipos están dotados de un zócalo ZIP. Ambos modelos soportan asimismo las futuras *Green CPU's* de bajo consumo que se adaptan a las especificaciones de *Energy Star*.



Los equipos incluyen 4 MB de memoria RAM ampliables mediante módulos SIMM hasta 64 MB, 8 KB de memoria caché en la propia CPU ampliables hasta 256 KB gracias a los zócalos libres de que dispone el equipo, interfases paralelo bidireccionales, 2 puertos serie y mouse, y los controladores de disco flexible, disco duro de bus IDE y de vídeo, y tres slots de 16 bits libres más dos de 8 bits.
La configuración estándar de vídeo dispone de 1 MB de memoria, ampliable opcionalmente hasta 2 MB, y permite visualizar resoluciones de 640x480 y 800x600 puntos con 64 000 colores, 1 024x768 puntos con 256 colores, (64 000 con 2 MB de memoria), 1 280x1 024 puntos con 16 colores, (256 colores con 2 MB).

LOS ANILLOS DE NE



En el verano de 1610, poco después de haber construido su primera lente, Galileo comunicaba a Johannes Kepler su reciente descubrimiento: Saturno tenía, según parecía, la forma de un triple globo, casi la de una esfera flanqueada por dos asas. Pese a su error de interpretación, Galileo se convirtió así en el primer hombre que contempló los anillos de Saturno. También acababa de augurar el papel que desempeñarían las técnicas modernas de observación en la comprensión de estos sorprendentes objetos. Discos delgados, que rodean a los planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno), constituidos por miles de millones de partículas que chocan incesantemente entre sí, los anillos son hoy en día para los astrónomos unos formidables laboratorios naturales: parece que en ellos tienen lugar procesos físicos comunes a muchos «discos colisionales» y estructuras aplanadas que existen en el Universo, como las galaxias espirales y nuestro propio sistema solar cuando éste todavía no era más que un gigantesco disco de polvo y de planetesimales en el que iban a surgir, por colisiones y aglomeraciones sucesivas, los actuales planetas. La historia de los anillos de Neptuno (fig. 1), los últimos descubiertos, es ejemplar en este sentido. Desconocidos hace diez años, constituyen actualmente una prueba clave para resolver algunos de los problemas de dinámica con los que se enfrentan los astrónomos. Es verdad que incluyen sorprendentes «arcos» de materia, que se han podido seguir durante más de cinco años, bien desde la Tierra, bien gracias a la sonda norteamericana Voyager, lo que permite percibir bastante bien en la actualidad los condicionantes físicos que rigen su evolución.

Los astrónomos se interrogaron durante mucho tiempo sobre la aparente singularidad de Saturno. Sólo tres siglos y medio después de la observación de Ga-

PTUNO

BRUNO SICARDY

LOS ALREDEDORES DE NEPTUNO DESVELAN POCO A POCO SU SORPRENDENTE RIQUEZA. HACE UNOS CINCO AÑOS, LA SONDA NORTEAMERICANA «VOYAGER» SOBREVOLABA EL PLANETA Y RECOGÍA UNA FORMIDABLE COSECHA DE INFORMACIONES SOBRE SUS ANILLOS Y LOS CURIOSOS OBJETOS QUE ALBERGAN: LOS ARCOS DE MATERIA. AHORA, ES EL MOMENTO DE LOS ANÁLISIS Y DE LOS PRIMEROS BALANCES. ¿CÓMO APARECIERON TALES ESTRUCTURAS Y CÓMO RESISTEN LA PRUEBA DEL TIEMPO? ¿QUÉ INFLUENCIA EJERCEN SOBRE LOS PEQUEÑOS SATÉLITES OBSERVADOS EN SUS PROXIMIDADES? RESPONDER A ESTAS PREGUNTAS NO TIENE NADA DE ANODINO: LOS PROBLEMAS DINÁMICOS QUE SE PRESENTAN REMITEN EN CIERTA MANERA AL PASADO DE LOS PLANETAS. ASÍ, AUNQUE YA NO ATESTIGUAN LAS CONDICIONES EXACTAS QUE REINABAN EN EL SISTEMA SOLAR PRIMORDIAL, LOS ARCOS PODRÍAN REVELAR NO OBSTANTE A QUÉ SE PARECÍA EN ALGUNOS MOMENTOS DE SU HISTORIA...

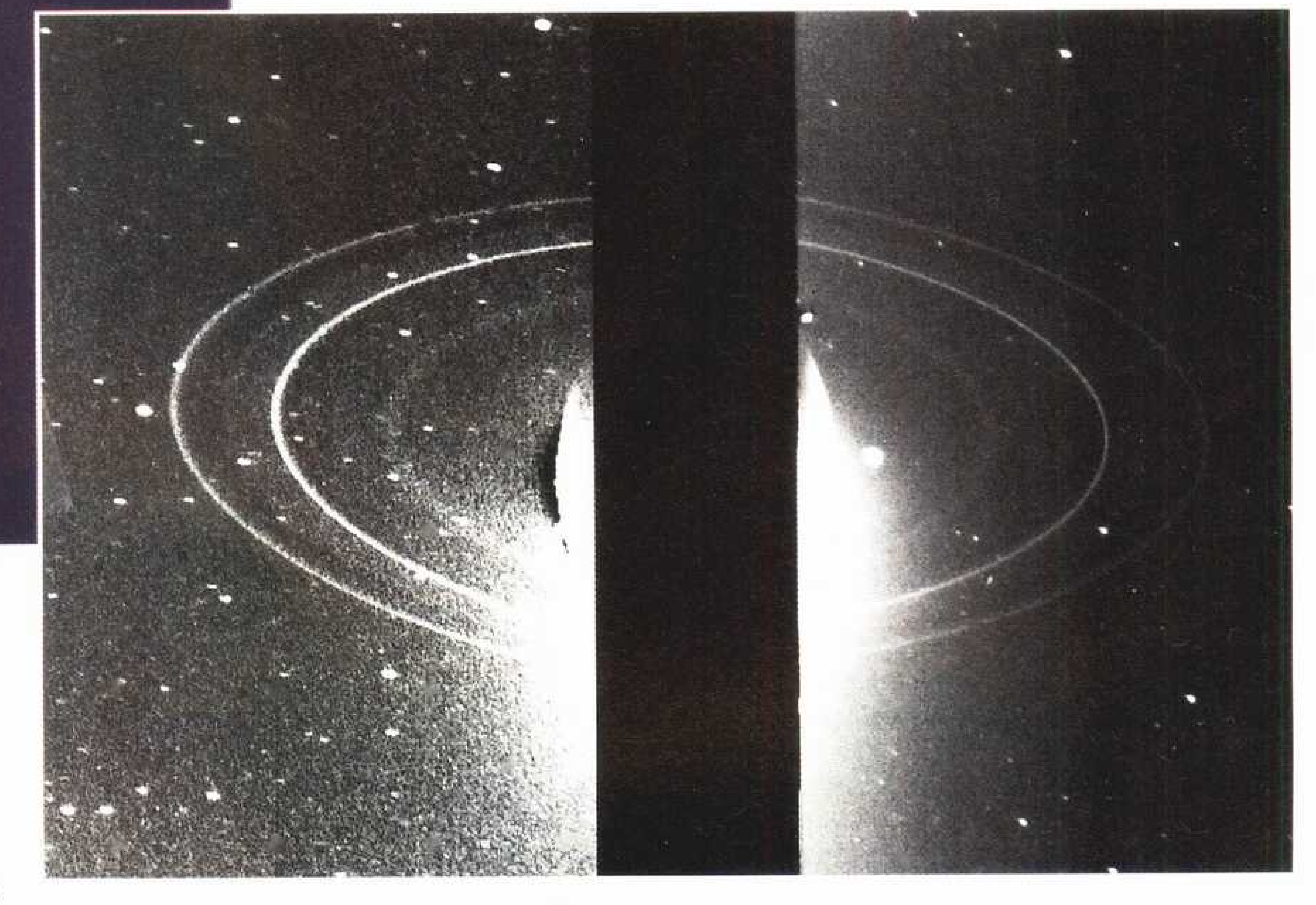


Figura 1. Octavo planeta por orden de distancias que gravita alrededor de nuestro sol, Neptuno solamente es objeto de intensas observaciones desde la Tierra desde hace una quincena de años. En agosto de 1989 la sonda norteamericana Voyager 2 fotografiaba con gran ángulo de fase, es decir, «con el Sol de cara», el conjunto de estos anillos cuya presencia se había presentido a partir de 1984. Además de los dos principales, estrechos, llamados Adams (anillo externo) y Le Verrier (interno), aparecen dos objetos más difusos —la «meseta» situada entre los dos anillos principales y el anillo Galle, el más próximo a Neptuno— que se extienden en anchura sobre 4 000 y 1 700 kilómetros respectivamente. Estos anillos están formados por miles de millones de partículas que, capturadas por la gravedad, describen alrededor de Neptuno (disco sobreexpuesto visible en el centro de la imagen) unas trayectorias casi circulares. Hace unos 4 500 millones de años, nacía nuestro propio sistema solar en un disco de polvo y de pequeños cuerpos en rotación alrededor de una joven estrella. ¿Intervienen actualmente los mismos mecanismos de confinamiento de la materia en los anillos de Neptuno? (Fotos JPL/NASA.)

BRUNO SICARDI
es profesor en la universidad Pierre-Marie Curie. Trabaja actualmente en el Observatorio de París sobre los problemas de dinámica relacionados con los anillos planetarios y con los granos de polvo en la nube zodiacal. También estudia los discos de polvo circumestelares así como la dinámica de las estratosfreas de los planetas gigantes.

lileo los anillos han aparecido como un fenómeno común a todos los planetas gigantes, y se ha podido reconstruir a grandes rasgos el escenario general de su formación (véase el recuadro 1). En primer lugar, 1977, equipos del Lowell Observatory y de la universidad de Cornell, en Estados Unidos, así como del Indian Institute of Astrophysics en Bangalore, observaron la ocultación de una estrella por Urano. En este tipo de experimentos, se mide la señal de una estrella que desaparece detrás de un planeta, durante el movimiento aparente de este último por la esfera celeste. La caída de la luminosidad de la estrella nos informa entonces sobre las altas capas atmosféricas del planeta (perfil de temperatura, composición del gas, etc.). Y, de forma inesperada, la estrella observada aquel año desapareció muy brevemente nueve veces antes de ser ocultada por Urano, y luego otras nueve veces después de la ocultación propiamente dicha. Era la indicación de que, alrededor de Urano, existían unos anillos extraordinariamente estrechos, casi unos «hilos» a escala del planeta, demasiado delgados para poder ser directamente detectados en las imágenes desde la Tierra, pero suficientemente densos para atenuar la señal de la estrella.

Lanzadas este mismo año 1977, las sondas norteamericanas *Voyager* iban a revolucionar nuestros conocimientos sobre los planetas gigantes y su entorno. En 1979, las imágenes tomadas por *Voyager 1* (en marzo) y luego por *Voyager 2* (en julio) desvelaron la presencia de un anillo estrecho que rodea a Júpiter, a 129 000 kilómetros de su centro. Este anillo plano se difuminaba gradualmente hacia el interior en un halo de varios miles de kilómetros de grosor y también se prolongaba hacia el exterior en una estructura difusa compuesta de polvo. Algunos meses más tarde, en 1980, las sondas llegaban a Saturno: en las imágenes tomadas a alta resolución, los anillos del planeta aparecían formados por miles de estructuras encajadas unas en otras, cada vez más estrechas. Se observaban delgadas divisiones, así como unas ondulaciones espirales, unos grumos, unos alabeos, indicios de que intervenían diferentes procesos físicos sobre la materia circumplanetaria.

Neptuno, el último de los planetas gigantes, resistió mejor los embates de los descubridores de anillos por su alejamiento. Este planeta de 25 000 kilómetros de radio, de una masa unas diecisiete veces mayor que la de la Tierra, evoluciona a unos cuatro mil quinientos millones de kilómetros de nosotros, y su diámetro aparente en el cielo es ligeramente superior a dos segundos de arco, un tamaño que apenas distinguen los telescopios terrestres en las condiciones atmósfericas habituales. También en este caso, las ocultaciones de estrellas por el planeta fueron una ayuda preciosa para descubrir sus anillos. Sin embargo, y a diferencia de los de Urano, los anillos de Neptuno se mostraron muy discretos y se mezclaron varias falsas alarmas con las verdaderas detecciones.

La primera verdadera campaña de observación tendente a detectarlos por ocultación estelar tuvo lugar en mayo de 1981. Los resultados fueron escasos: algunos equipos no señalaron ningún acontecimiento que indicase la presencia de cualquier tipo de anillo, mientras que un grupo de la universidad de Arizona, que utilizaba dos telescopios separados seis kilómetros, observó una brusca desaparición de la estrella detrás de un objeto de un centenar de kilómetros de diámetro.[1,2] Más adelante, los astrónomos se dieron cuenta de que se trataba de la primera detección del satélite Larisa (200 kilómetros de diámetro) que pasó justo por delante de la estrella en una época en la que sólo se conocían dos satélites de Neptuno: Tritón y Nereida... Este resultado alentador, aunque escaso, suscitó una amplia campaña de observaciones desde la cuenca del Pacífico durante una nueva ocultación en junio de 1983. Pero las observaciones realizadas con el telescopio Canadá-Francia-Hawai por un equipo francés[3] demostraron en esta ocasión que Neptuno no poseía anillos continuos de densidad significativa y de anchura superior a trescientos metros. El interés de los astrónomos decayó y sólo dos equipos, de la universidad de Ari-

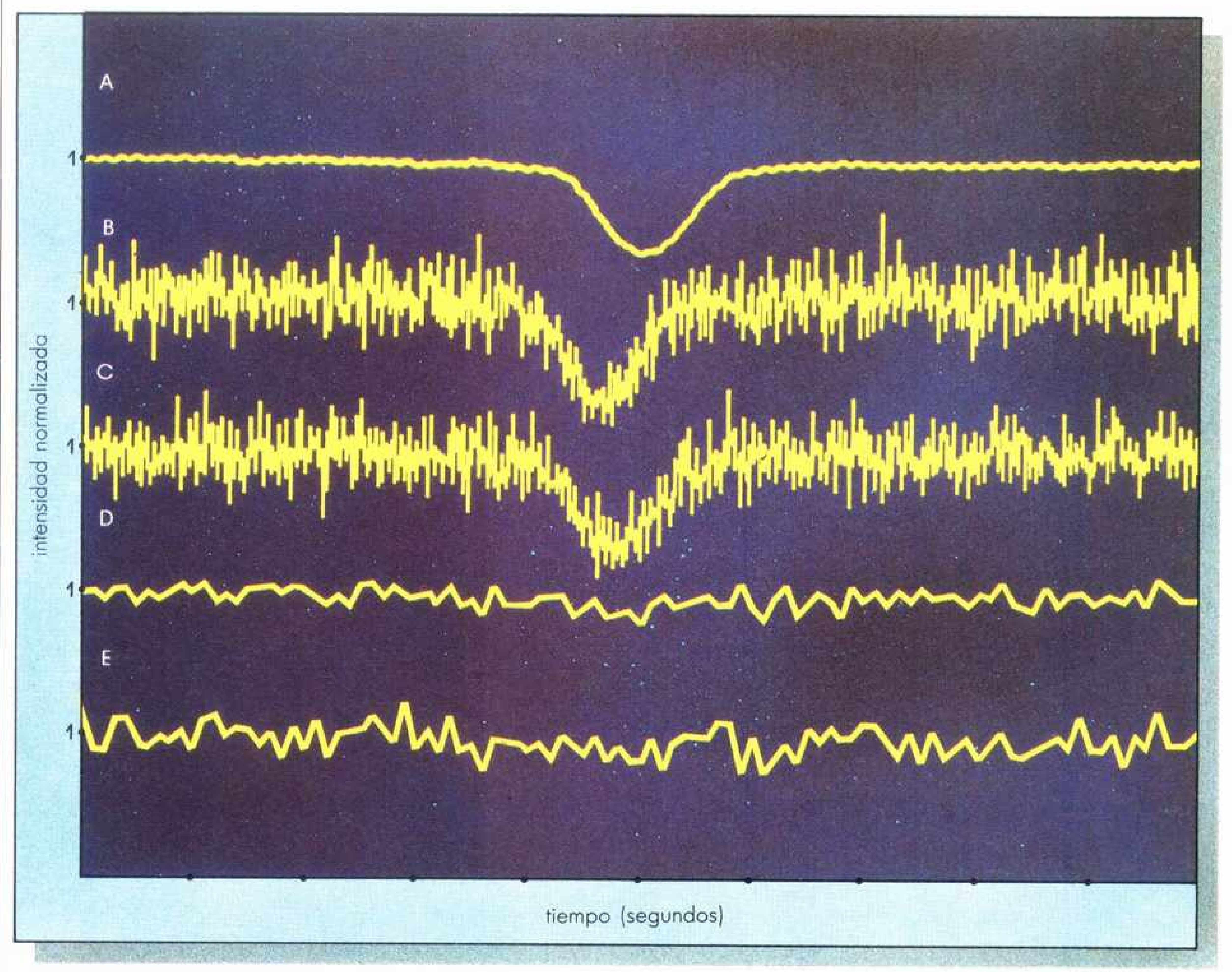


Figura 2. La primera detección de un anillo de materia alrededor de Neptuno tuvo lugar en Chile, en julio de 1984, durante la ocultación de una estrella por el planeta. Los dos telescopios del Observatorio europeo austral, observando en el infrarrojo a 2,2 µm de longitud de onda (A) y a 0,9 µm (B), así como el del Observatorio interamericano de Cerro Tololo (0,9 µm en C) registraron una breve caída de la intensidad luminosa procedente de la estrella, prueba de que había sido eclipsada por un objeto estrecho situado a unos 2,5 radios del planeta. El mismo acontecimiento no se reproducía en el otro lado del planeta, señal de que se trataba de un anillo incompleto o, dicho de otro modo, de un arco de materia. Por tanto son necesarios varios telescopios que observan a diferentes longitudes de onda para verificar que la disminución de la señal no es un efecto parásito debido por ejemplo a la turbulencia atmosférica terrestre (D y E corresponden a canales del intervalo visible tomados como referencia). (Según W.B. Hubbard et al., ref. (4).)

zona y del Observatorio de París, organizaron misiones de observación en Chile por ocultación en julio de 1984. Esta vez la suerte acudió a la cita, ya que los dos telescopios del Observatorio europeo austral, en La Silla, y el del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, cien kilómetros más al sur, detectaron una breve disminución de la señal procedente de la estrella (fig. 2). El análisis detallado de este acontecimiento, en particular la caída de la intesidad luminosa y la ligera separación en el tiempo de llegada de la señal a los diferentes telescopios, permitió concluir que en este caso se trataba claramente de un anillo situado en el plano ecuatorial de Neptuno, a menos de tres radios del planeta.[4]

Dos características del objeto hacían de él un anillo estrecho totalmente comparable a los observados alrededor de Urano: su anchura (unos quince kilómetros) y su espesor óptico (7 %) que corresponde a la fracción de energía que absorbe cuando lo atraviesan los rayos luminosos (por tanto este parámetro mide en cierto sentido la opacidad del anillo y permite evaluar su densidad). Pero, un hecho notable, la señal no había resultado atenuada cuando la estrella había pasado por el otro lado del planeta, lo que hacía del objeto un anillo incompleto, dicho de otro modo un «arco». Al realizar un análisis sistemático de todas las ocultaciones estelares observadas desde la Tierra en los años 80, dos grupos de astrónomos, uno de la universidad de Cornell y el otro del Observatorio de París, demostraron entonces, en 1990, que los arcos de Neptuno habían sido detectados de manera indudable al menos tres veces, desde lugares tan diferentes como Chile, Hawai y África del Sur.[5,6]

La estrechez de los anillos de Urano había planteado en 1977 un importante problema de dinámica: ¿cómo se podían agrupar en una zona de algunas decenas de kilómetros e incluso de algunos centenares de metros de anchura unas partículas que sufrían frecuentes colisiones unas con otras? Los cálculos demostraban que este juego de colisiones habría tenido que difuminar estos delgados anillos en, a lo sumo, un millón de años... El problema se complicó todavía más con los arcos de Neptuno: ahora se tenía que explicar cómo podía permanecer confinada la materia no solamente en anchura, sino también en una longitud determinada. ¿Cuál era además el número exacto de estos arcos y dónde se localizaban? Las especulaciones, tanto teóricas como observacionales, estaban en pleno auge la víspera del encuentro de Neptuno con *Voyager 2*.

El descubrimiento de los anillos en 1984 había llevado a los responsables de la NASA a reestructurar el programa de observación de los alrededores de Neptuno por la sonda, con objeto de aprovechar al máximo su paso para observar los anillos, y también con objeto de evitarle colisiones intempestivas con esta materia circumplanetaria. Esto era muy difícil ya que el *Voyager* tenía que «rozar» el polo norte de Neptuno, a menos de cinco mil kilómetros de su atmósfera, para poder adquirir un impulso que le permitiese dirigirse luego hacia su satélite Tritón. Además, para evitar las imágenes «movidas», habida cuenta de los tiempos de exposición (varias decenas de segundos, incluso varios minutos) exigidos por el modesto flujo solar a nivel de Neptuno y el escaso poder reflector de los anillos, se tenía que compensar la inevitable deriva de la sonda con delicados movimientos de la plataforma que sostenía las cámaras. De este modo *Voyager 2* pudo obtener y tratar por los métodos de procesado de imágenes de la sonda más de ochocientas fotografías de los anillos.[7] Aunque hasta entonces habían sido más que discretos, los anillos clásicos, es decir completos, aparecían en las fotografías. Incluso se pudieron observar bajo diferentes ángulos de fase (ángulo formado por las líneas Sol-anillos y anillos-sonda), gracias al propio movimiento del *Voyager*. La observación con un ángulo de fase próximo a 180 grados, es decir, «con el Sol de cara», permite, en particular, ver mejor las partículas de algunos micrómetros, de forma similar a como se manifiestan las partículas de polvo en una habitación oscura iluminada solamente por un rayo de luz. Bajo este ángulo aparecen claramen-

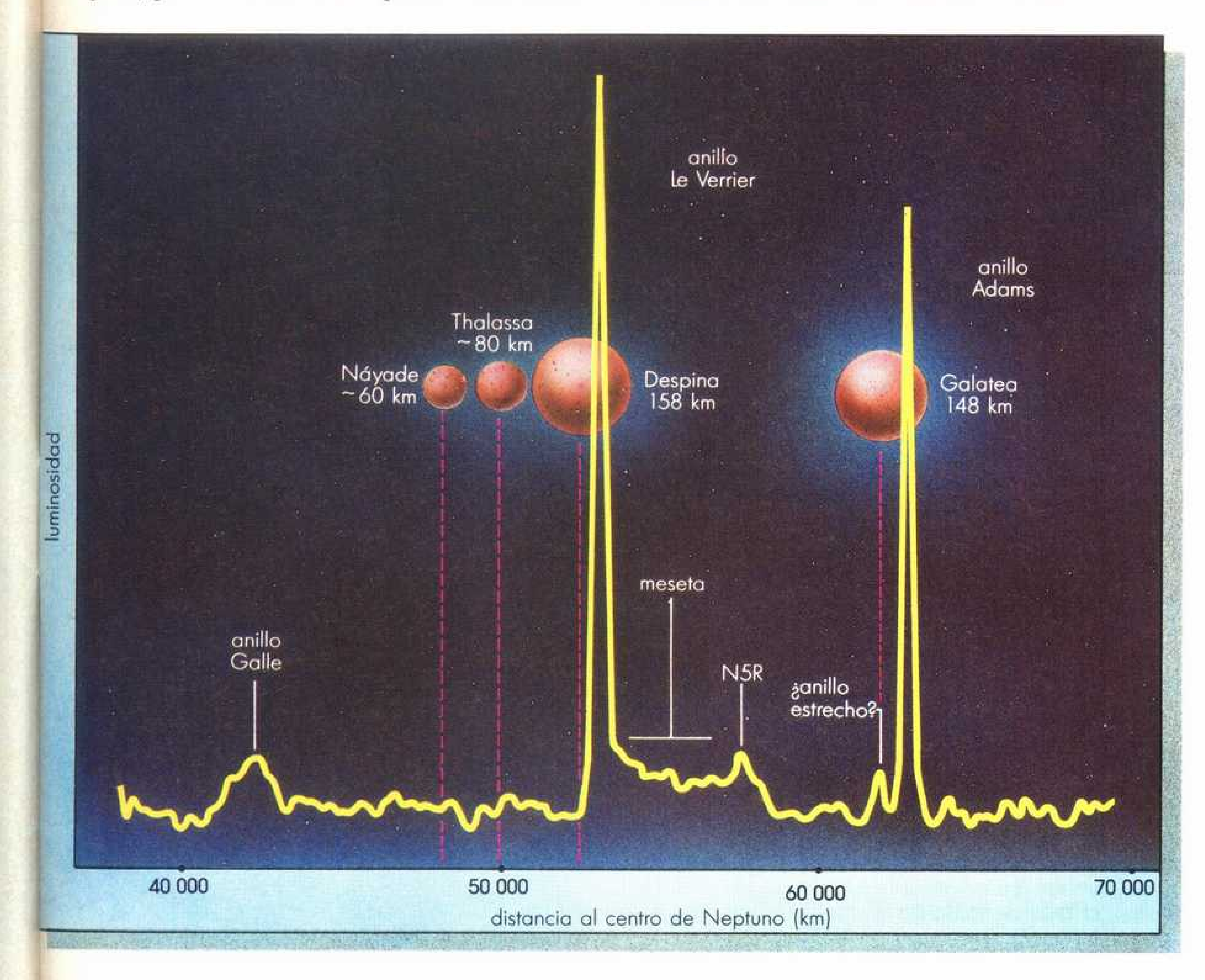


Figura 3. Los alrededores de Neptuno evocan una vasta labor de encaje cósmica, en la que regiones aparentemente vacías bordean a agrupaciones de materia. Este perfil de luminosidad obtenido por barrido radial de imágenes similares a la de la figura 1, muestra la distribución radial de la materia en los anillos, entre 40 000 y 70 000 kilómetros alrededor de Neptuno. Se han superpuesto a la imagen cuatro de los seis satélites detectados por Voyager, con su respectivo diámetro (indicado en km) exagerado con objeto de que se pueda apreciar su tamaño relativo. Se nota inmediatamente la proximidad entre los dos anillos principales y los dos satélites más grandes. Pero los teóricos todavía tienen que descubrir todos los detalles de los mecanismos de interacción física que intervienen... También se observan otras estructuras más discretas, invisibles en las fotografías de Voyager: así la meseta parece orlada por un anillo estrecho (N5R) por su borde externo. Igualmente, el satélite Galatea podría compartir su órbita con otro anillo estrecho. Finalmente, una componente difusa se podría extender desde el anillo Le Verrier hasta el propio planeta. (Según C.C. Porco et al., in Neptune and Triton, D.P. Cruikshank y M.S. Matthews (eds.), a aparecer en 1994.)

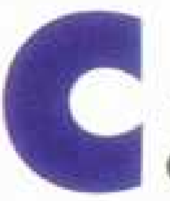
(1) H.J. Reitsema *et al., Science, 215*, 289, 1982.
(2) W.B. Hubbard, *Science, 231*, 1276, 1986.
(3) B. Sicardy *et al., Nature, 320*, 729, 1986.
(4) W.B. Hubbard *et al., Nature, 319*, 636, 1986.
(5) P.D. Nicholson *et al., Icarus, 87*, 1, 1990.
(6) B. Sicardy, F. Roques y A. Brahic, *Icarus, 89*, 220, 1990.

te dos anillos estrechos (fig. 1), denominados Adams y Le Verrier por el nombre de los dos astrónomos, el inglés John Couch Adams y el francés Urbain Le Verrier que establecieron por medio del cálculo, en el siglo XIX, la existencia del planeta Neptuno. El anillo exterior, Adams, está situado a unos 62 900 kilómetros del centro del planeta. Su anchura no se ha podido determinar directamente en las imágens, pero en todo caso es inferior a una veintena de kilómetros. El anillo interior, situado a unos 53 200 kilómetros de Neptuno, tiene un aspecto globalmente parecido al primero. Su anchura media, también aquí, está por debajo del poder de resolución de las cámaras de la sonda. No obstante, la observación por *Voyager* de la ocultación de la estrella σ Sagittarii parece indicar que en algunos lugares tiene una anchura del orden de cien kilómetros. Dos estructuras anchas y difusas rodean también a Neptuno: una, llamada «la meseta», que se extiende sobre unos cuatro mil kilómetros entre los dos anillos principales y la otra, el anillo Galle (por el nombre del astrónomo alemán que, el 23 de setiembre de 1846 observó por primera vez Neptuno siguiendo las indicaciones de Le Verrier), de una anchura aproximada de 1 700 kilómetros, situado a 42 000 kilómetros del centro del planeta. Tanto la meseta como el anillo tienen espesores ópticos muy pequeños, del orden del 0,01 %, lo que significa que dejan pasar el 99,99 % de la luz.

La naturaleza fisicoquímica de estos anillos todavía es poco conocida, de una parte porque *Voyager* no poseía un espectrómetro, infrarrojo en concreto, capaz de detectar las bandas de absorción de los hielos y los silicatos y, de otra, porque no se ha podido realizar ninguna medida *in situ* (con un espectrógrafo de masas por ejemplo). El estudio de la luz difundida por los anillos ha proporcionado algunas informaciones, si bien las conclusiones que se pueden sacar en cuanto a la naturaleza de las partículas no son unívocas. Según el tamaño y la naturaleza química de los granos que encuentra, la luz solar se difunde en unas direcciones privilegiadas: en la dirección de los rayos incidentes, hacia atrás y hacia adelante, si se trata de granos de un tamaño inferior al micrómetro, es decir, inferior a la longitud de onda de la luz, y fundamentalmente hacia atrás si se trata de granos grandes (una fracción de milímetro o más). Pero las partículas detectadas en las imágenes *Voyager* están precisamente entre estos dos extremos —a diferencia de los anillos principales de Urano en los que la mayor parte de las partículas tienen tamaños iguales o superiores al centímetro— y por tanto difunden la luz hacia atrás. No obstante, se puede concluir que el poder reflector de las partículas más grandes es del orden del 4 %, lo que corresponde a un material extremadamente oscuro, similar al detectado en los anillos de Urano y en el cometa Halley. Se podría tratar de silicatos y también de hielo «sucio», es decir, que contiene un material más absorbente, cosa que confirmaría el color rojizo de los anillos, debido verosímilmente a la presencia de hielos contaminados por compuestos orgánicos.[8]

Los dos únicos instrumentos de la sonda que pudieron recoger más informaciones directas fueron la antena de radio y el espectrómetro de ondas de plasma. Los choques a gran velocidad —veinticuatro kilómetros por segundo— de las partículas con la sonda engendraron nubes de plasma que a su vez provocaron saltos de tensión de la antena. Y se produjeron dos bombardeos particularmente intensos durante los pasos de la sonda por el plano ecuatorial de Neptuno, a 3,4 y 4,2 radios planetarios. Por tanto este nuevo anillo se encontraría mucho más allá de la región de los arcos, que está situada a 2,5 radios planetarios. Según el análisis realizado, en 1991, en el Observatorio de París,[9] la antena de radio habría detectado partículas de un tamaño variable entre dos y seis micrómetros. El anillo así descubierto sería grueso ya que su parte más densa tendría una extensión vertical de setecientos kilómetros. En cambio, sería extremadamente poco denso, con un espesor óptico que no supera el 0,0001 %. Actualmente se están realizando estudios para intentar determinar el origen de estas partículas.

Paralelamente, el vuelo de *Voyager* ha permitido elevar la lista de satélites de



Cómo nacen los anillos

1

Los anillos planetarios se forman verosímilmente debido a la misma causa que impide que los grandes planetas sobrevivan demasiado cerca de un planeta. En efecto, un satélite no se puede considerar como un punto material y, si circula en una órbita demasiado próxima a su planeta, experimentará de forma crítica los llamados «efectos de marea»: su cara más próxima al planeta está sometida a una atracción gravitatoria de este último mayor que su cara más alejada. Esta atracción diferencial deforma poco a poco al satélite, con una intensidad tanto mayor cuanto más cerca está del planeta. Para una cierta distancia, llamada límite de Roche (por el nombre del físico francés que describió por primera vez el fenómeno en 1850), un cuerpo cuyas fuerzas de cohesión interna son demasiado débiles para contrarrestar esta deformación se rompe. No obstante algunos cuerpos sólidos pueden sobrevivir en el interior de este límite: así un satélite de hielo de alrededor de cien kilómetros de radio es susceptible de circular cerca de un planeta como Saturno. ¡Y nosotros mismos evolucionamos en el interior del límite de Roche de la Tierra! La mayoría de los anillos están situados en el interior del límite de Roche de su planeta gigante respectivo, por tanto las fuerzas de marea son, según parece, suficientemente importantes para impedir que los miles de millones de partículas que evolucionan en estos medios ricos en materia (mucho más ricos que las proximidades de los planetas telúricos como la Tierra y Marte) se aglomeren en pequeños satélites. Por el contrario, las colisiones que sufren estas partículas durante su revolución las extienden en un disco delgado más o menos ancho situado en el plano ecuatorial del planeta madre.

No obstante, subsisten numerosas controversias respecto a la edad que puedan tener y a la evolución de estos anillos. ¿Aparecieron al mismo tiempo que su planeta respectivo, o son por el contrario el resultado de una catástrofe reciente (desde el punto de vista astronómico) en la que un satélite o un cometa se ha roto en el límite de Roche? Varios indicios hacen pensar que los anillos difícilmente han podido sobrevivir a los cuatro mil quinientos millones de años del sistema solar. Por ejemplo, el bombardeo meteorítico que sufren los anillos de Urano es suficiente para erosionar estos últimos en algunos millones de años. Por ello se impone poco a poco la idea de que los anillos han sufrido numerosas destrucciones antes de formarse de nuevo por colisión o ruptura de un cuerpo celeste que ha franqueado el fatídico límite de Roche.



Neptuno de dos —Tritón y Nereida, que gravitan en promedio a 355 000 kilómetros y a 5,5 millones de kilómetros respectivamente— a ocho. Denominados Náyade, Thalassa, Despina, Galatea, Larisa y Proteo, los seis nuevos cuerpos se escalonan en órbitas situadas entre 48 000 y 118 000 kilómetros del centro del planeta. Así redefinida por *Voyager*, la nueva distribución de la materia alrededor de Neptuno revela turbadoras relaciones de vecindad (fig. 3): así cada uno de los dos anillos más densos, Adams y Le Verrier, está muy cerca de uno de los dos satélites de mayor masa situados en esta misma zona, Galatea y Despina. Aunque su «promiscuidad» hace pensar que existe entre ellos una probable conexión dinámica, esta hipótesis la ilustran aún mejor las estructuras más visibles de los anillo de Neptuno: los tres arcos principales revelados por *Voyager*.

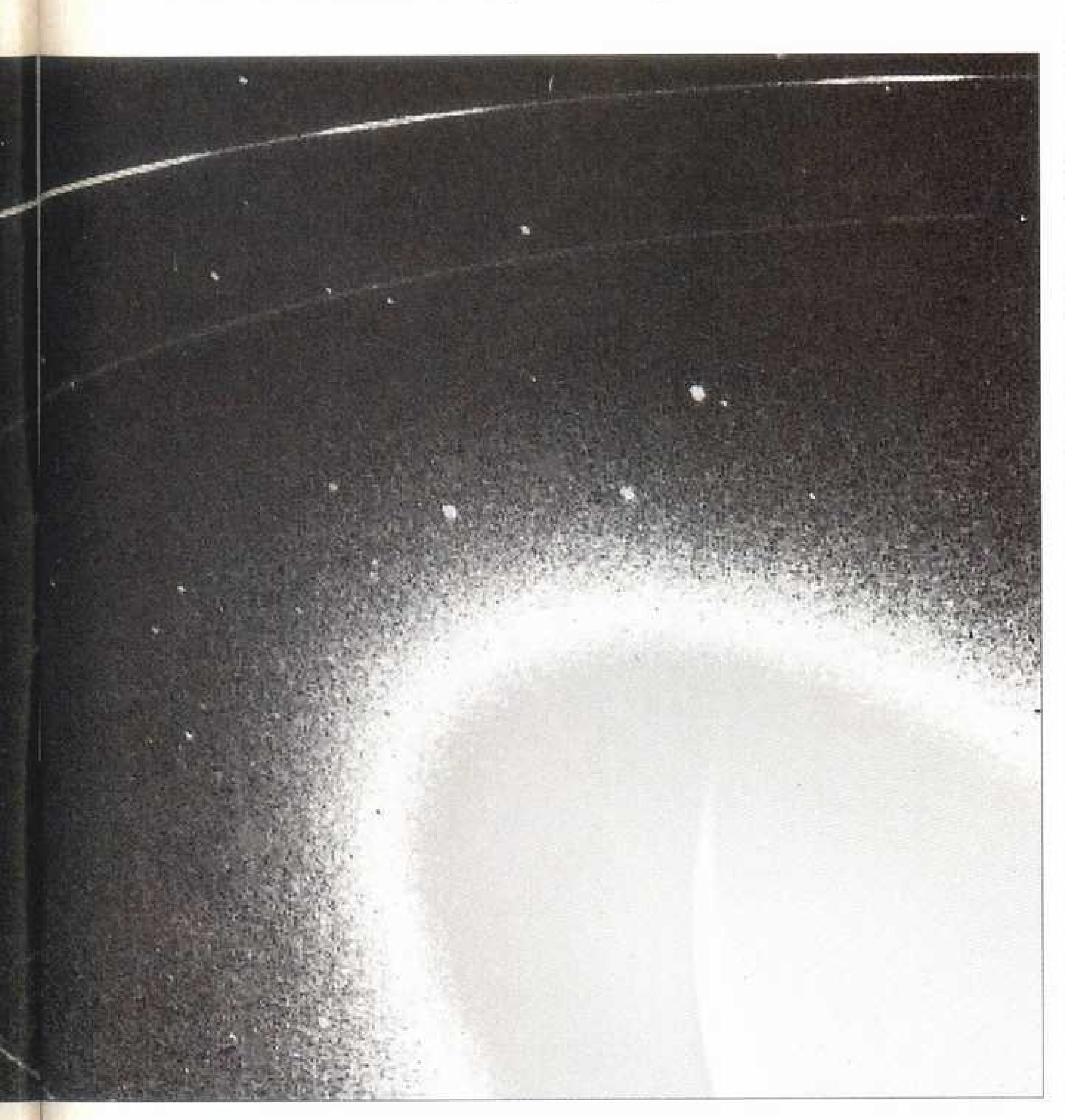
Compuestos al menos en un 50 % por partículas de tamaño inferior al micrómetro,[8] estos arcos, llamados Libertad, Igualdad y Fraternidad, comparten la órbita del anillo Adams (fig. 4). Entre los tres cubren una cuarentena de grados de longitud (un grado corresponde a una «longitud de cuerda» de unos mil kilómetros) mientras que su tamaño propio es de cuatro grados en el caso de los dos primeros y de diez grados en el del tercero. El estudio de su perfil de brillo revela la presencia de un cuarto arco, menos luminoso y que mide alrededor de un grado de longitud, que estaría situado justo delante del arco Libertad. Observado a muy alta resolución, el arco Fraternidad presenta además un aspecto curiosamente alabeado (fig. 4). Este efecto se debe a la combinación involuntaria del movimiento de la sonda y del movimiento orbital de las partículas del arco. De hecho, cada alabeo, ficticio, representa un «grumo» del arco, una aglomeración local de materia cuya longitud típica es del orden de quinientos kilómetros. Estos grumos son visibles en varias imágenes, tanto a pequeño como a gran ángulo de fase y, como ha demostrado A. Ferrari del Observatorio de Meudon, son estables durante varios días.[8]

El problema de la estabilidad de estos arcos resulta muy crucial en el momento actual ya que, teniendo en cuenta su anchura, las leyes de la mecánica celeste impondrían que sólo sobreviviesen muy poco tiempo. En efecto, existe en principio un *movimiento diferencial* entre las partículas situadas hacia el interior y las situadas hacia el exterior de los arcos, más alejadas de Neptuno estas últimas, que girarían un poco más lentamente que las primeras. Este proceso tendría que extender los arcos en longitud en menos de cuatro años. A menos que una suerte extraordinaria nos haya permitido observarlos justo en el momento de su formación, hay que encontrar un mecanismo físico capaz de explicar este equilibrio tan sutil. Hasta ahora se han propuesto varios modelos.

Se puede pensar, por ejemplo, en fenómenos de inestabilidad provocados por la atracción mutua entre partículas: más allá de una cierta densidad, la gravitación que hace que las partículas se atraigan entre sí puede contrarrestar a las fuerzas de marea que tienden a dispersarlas en algunos lugares (véase el recuadro 1). Sin embargo, los anillos de Neptuno son demasiado tenues para que se desarrollen estas inestabilidades.

Otra posibilidad es que todas las velocidades angulares medias de las partículas sean rigurosamente iguales y que las partículas se desplacen conjuntamente, aunque describan órbitas diferentes. Sin embargo, es difícil ver cómo se podría producir esta coincidencia y, sobre todo, persistir con las colisiones que inevitablemente tendrían que destruir este hermoso conjunto. Se estima, así, que una partícula de los arcos sufre en promedio una colisión cada veinte revoluciones.

De una forma que parece premonitoria, los modelos avanzados justo después del descubrimiento de los arcos recurrían, para explicar su presencia, a un hipotético satélite de Neptuno. Así, en 1985, el astrónomo norteamericano Jack Lissauer pensaba que los arcos corresponden a materia confinada en la órbita misma de un satélite.[10] Este cuerpo, de un centenar de kilómetros de diámetro, habría capturado a las partículas en unos puntos de equilibrio precisos llamados «puntos de Lagrange» situados a sesenta grados de longitud a uno y otro lado



B

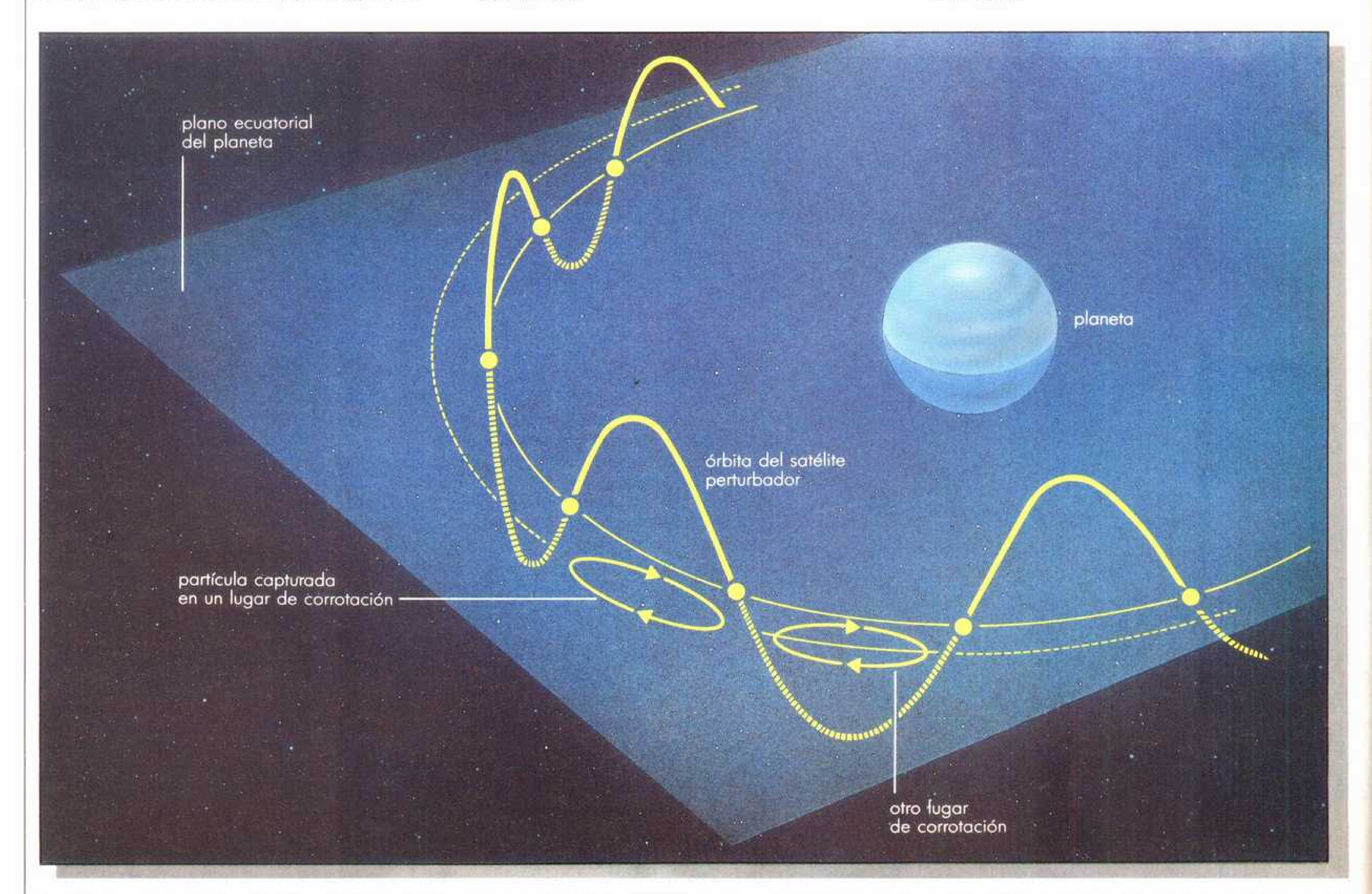
Figura 4. Observados por Voyager el año del bicentenario de la revolución francesa, los tres arcos de materia que evolucionan alrededor de Neptuno recibieron los nombres de Libertad, Igualdad y Fraternidad (A). Están situados en el anillo exterior Adams y se extienden sobre unos cuatro mil (en el caso de los dos primeros) y diez mil kilómetros de longitud. Un cuarto arco menos brillante se desplaza justo delante del arco Libertad. Con su descubrimiento, la feria de curiosidades del sistema solar se ha enriquecido con una nueva categoría de objetos. A la vez estrechos, como los anillos, y «truncados», estos objetos desafían doblemente a las leyes de la mecánica celeste, que predicen que se tendrían que extender tanto radialmente como en longitud. Para explicar su aparente estabilidad, los astrónomos invocan actualmente la interacción con un pequeño satélite, cuya atracción gravitatoria permitiría capturar las partículas de los alrededores de Neptuno en unos lugares muy concretos. El aspecto curiosamente «alabeado» del arco Fraternidad observado a alta resolución (B) es de hecho el resultado de dos movimientos diferentes. Uno se debe al movimiento de la sonda, que extiende la imagen perpendicularmente al arco, y el otro se debe al movimiento orbital de las partículas, que las arrastra paralelamente al arco. Por esta causa, unas aglomeraciones de materia reales, pero cuya presencia todavía está por explicar, aparecen en la fotografía como una yuxtaposición de trazos oblicuos. (Fotos JPL/NASA.)

(7) B.A. Smith *et al., Science, 246*, 1422, 1989.
(8) C. Ferrari, «Etude photométrique des anneaux de Neptune», tesis de doctorado, Univ. de París 7, 1992.
(9) B.M. Pedersen *et al., J. Geophys. Res., 96* (suplemento), 19187, 1991.
(10) J.J. Lissauer, *Nature, 318*, 544, 1985.
(11) P. Goldreich, S. Tremaine y N. Borderies, *Astron. J., 92*, 490, 1986.

Las trampas de la resonancia

Cuando las partículas se encuentran cerca de una «resonancia de movimiento medio» con un satélite y éste además evoluciona en una órbita inclinada, su trayectoria, observada por las partículas, toma el aspecto de arcos que pasan sucesivamente por encima y por debajo del plano ecuatorial del planeta (véase el dibujo). La comensurabilidad de los periodos de revolución garantiza que las partículas volverán a ver periódicamente a los arcos en la misma configuración. Y cada vez que el arco cruza el plano ecuatorial del planeta, el satélite está más cerca de la partícula que cuando el arco culmina por encima o se hunde por debajo del plano ecuatorial. Las partículas son afectadas por las pequeñas, pero sistemáticas, diferencias de atracción gravitatoria resultantes y realizan un lento movimiento pendular en lo que se llama *un lugar de corrotación*. En el caso de los arcos de Neptuno, la relación entre los movimientos medios de los arcos y del satélite vale 42/43, es decir, los arcos efectúan 42 revoluciones cuando Galatea efectúa 43, y la oscilación pendular en un lugar de corrotación puede requerir cinco años o más. Basta cambiar muy poco el radio de la órbita de la partícula para destruir este tipo de comensurabilidad y por tanto para que aquella escape del lugar de corrotación y empiece a explorar el conjunto de las longitudes, es decir 360 grados.

Señalemos, finalmente, que los lugares a cuyo alrededor oscilan las partículas están enfrente de los arcos descritos por el satélite. Se puede demostrar que estos lugares son *máximos* locales de energía potencial y que las partículas tenderán, por disipación de energía debida a las incesantes colisiones, a alejarse de ellos. No obstante, en determinadas condiciones, el satélite mismo puede proporcionar energía a los arcos y, de este modo, mantenerlos en su lugar. Desde luego, esta energía se tiene que «tomar» de alguna parte: en contrapartida el satélite se acercará lentamente a su planeta. No obstante, la disipación es tan pequeña que esta evolución de la órbita sólo es apreciable a escalas de tiempo muy largas.



del mismo (tales configuraciones ya existen en el sistema solar: una familia de asteroides, los Troyanos, circula por ejemplo en la órbita de Júpiter y está prisionera de los puntos de Lagrange del planeta). Además, como las miríadas de partículas de los arcos pierden energía debido a las colisiones, el modelo de Lissauer exigía la presencia de un segundo satélite para contrarrestar, por aportación de energía gravitatoria, esta disipación de energía en los arcos y mantener así su cohesión.

El año siguiente, un grupo del California Institute of Technology propuso un modelo más «económico». Solamente requería un satélite cuya órbita inclinada respecto al plano ecuatorial de Neptuno garantizaría la captura de las partículas en lugares bien precisos, también en este caso, llamados esta vez de «corrotación», a la vez que proporcionaría la energía disipada por las colisiones. Puede parecer sorprendente que un satélite, cuya órbita posee *a priori* una simetría de revolución alrededor de su planeta, pueda capturar partículas en unos lugares tan específicos en longitud. No obstante, esto resulta posible si los periodos de revolución de las partículas y del satélite alrededor del planeta tienen una relación de números enteros simples, dicho de otro modo, si a un número determinado de revoluciones efectuadas por las primeras le corresponde un número entero de revoluciones efectuadas por el satélite. Se dice entonces que las partículas están en «resonancia de movimiento medio» con el satélite (véase el recuadro 2). Es interesante señalar que estos dos modelos hacen posible el confinamiento de materia en unos puntos de equilibrio que, aunque estables, son máximos locales de energía.

De entrada, la confrontación de estos modelos con los datos de *Voyager* se reveló decepcionante: de una parte no se ha detectado ningún satélite en el anillo Adams a sesenta grados de los arcos y, de otra parte, el único cuerpo con una inclinación apreciable, Náyade, estaría

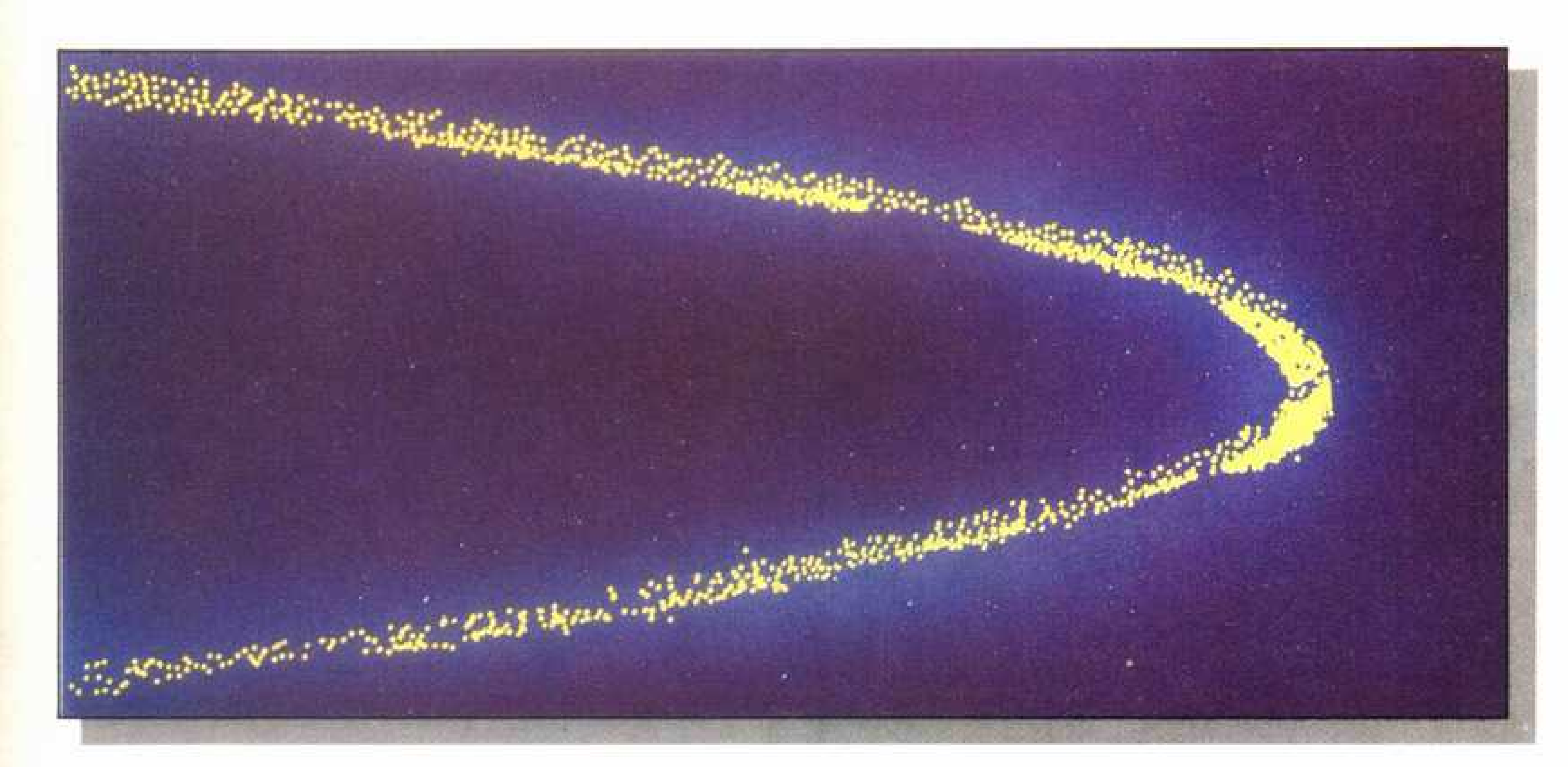


Figura 5. ¿Cómo evolucionarían diez mil partículas, liberadas inicialmente en un único punto en las proximidades de Neptuno con unas velocidades ligeramente diferentes, y sometidas a las perturbaciones del satélite Galatea? Esta simulación realizada en el Observatorio de París ilustra su comportamiento después de cuarenta mil revoluciones, es decir, quinientos años más tarde. El anillo simulado se ve bajo un ángulo de 2,5°. Muchas partículas todavía se encuentran en el lugar de corrotación inicial en el que las ha capturado el movimiento vertical de Galatea. En cambio, algunas se han podido difundir a lugares adyacentes. Otras forman finalmente un anillo continuo más difuso. (Simulación efectuada por D.W. Foryta[13].)

demasiado alejado de ellos para poder crear lugares de corrotación. Quedaba el satélite Galatea (150 kilómetros de diámetro), el más próximo al anillo Adams ya que gravita a menos de mil kilómetros de él, y cuya órbita se ha podido determinar con precisión gracias a las imágenes enviadas por la sonda. Sin embargo, su inclinación respecto al plano ecuatorial de Neptuno, apenas superior a 0,05 grados, parecía demasiado pequeña para poder capturar las partículas en lugares de corrotación.

Sin embargo, un análisis más fino pone de manifiesto una neta relación dinámica entre Galatea y los arcos. Como éstos han efectuado más de cuatro mil revoluciones entre el momento de su descubrimiento y las observaciones de *Voyager*, su movimiento se conoce ahora muy bien. Utilizando los elementos orbitales de Galaea, Carolyn Porco, de la universidad de Arizona, pudo localizar con gran precisión, en 1991, los lugares de corrotación engendrados por el satélite:[12] ¡éstos están situados a menos de 200 *metros* de la posición de los arcos! De hecho, los arcos están en una resonancia 42/43 con el satélite, es decir, que efectúan 42 revoluciones cuando Galaea efectúa 43.

¿Cómo se ha establecido una comensurabilidad tan extraña? ¿Es fruto del azar? Parece que no, y que sólo las partículas inicialmente próximas a los lugares de corrotación han podido ser «protegidas» por estos últimos, mientras que las partículas situadas un poco más lejos, apenas a algunos kilómetros, han escapado de su órbita inicial y, finalmente, han entrado en colisión con Galatea. De este modo, la misma presencia del Satélite habría vaciado indirectamente grandes regiones y, al revés, provocado concentraciones de materia en unas zonas muy privilegiadas alrededor de Neptuno.

La teoría también prevé que esta resonancia imprima un movimiento radial a los arcos, tanto más importante cuanto mayor es la masa del satélite. Este efecto evoca un poco el caso de una masa unida a un muelle: este sistema oscila con una gran amplitud si está sometido a una excitación externa cuya frecuencia tiene una relación sencilla con su frecuencia natural de oscilación. Este desplazamiento lateral de los arcos, de una treintena de kilómetros de amplitud, se observa efectivamente y su magnitud es totalmente compatible con la masa estimada de Galatea.

Una simulación numérica efectuada en el Observatorio de París en 1992 ha permitido precisar aún más este comportamiento.[13] Consistía en estudiar el movimiento de partículas de polvo liberadas alrededor de Neptuno —por ejemplo en colisiones— y luego sometidas a diferentes fuerzas, en particular a las perturbaciones de Galatea (fig. 5). En menos de un centenar de años, las partículas se aglomeran estadísticamente en unos lugares de corrotación de unos cuatro grados de longitud, lo que corresponde precisamente a la extensión de los arcos Libertad e Igualdad, y luego inician su movimiento de oscilación radial de una treintena de kilómetros. Pero al cabo de varios centenares de miles de revoluciones (es decir, varios siglos), ya no se comportan como simples péndulos «bloqueados» en un lugar de corrotación: el acoplamiento de sus pequeños movimientos en las tres direcciones del espacio provoca saltos caóticos de un lugar a otro. Así, una simple andanada de polvo liberada en un momento dado por una colisión puede, con el tiempo, difundirse lentamente de un lugar a otro y crear de este modo las sorprendentes estructuras que se observan actualmente.

Y, en este sentido, Neptuno no es un caso único; al analizar con mucha precisión las imágenes tomadas por las sondas *Voyager*, los astrónomos han podido detectar arcos de materia alrededor de Saturno y de Urano. Parece que con estas estructuras poseen una «instantánea» de lo que ha podido suceder alrededor de los planetas durante la historia del sistema solar: una etapa intermedia importante en la que las partículas permanentemente en colisión ya no están extendidas de forma homogénea sobre un disco, pero todavía no se han aglomerado en un pequeño satélite. En el caso de Neptuno, en especial, es la fuerza de marea (véase el recuadro 1) la que impide esta última eventualidad: tolera los pequeños satélites ya formados (por ruptura de un objeto mayor, por ejemplo), como Galatea o Larisa, pero en cambio rompe toda nueva aglomeración flocular de partículas a medida que aparece. Dicho esto, más lejos de Neptuno, e incluso en el sistema solar primitivo, tal mecanismo de confinamiento en arcos quizá contribuyó a formar nuevos cuerpos a partir de pequeñas partículas aisladas. Falta saber si tuvo tiempo...

Escribir la verdadera historia de los anillos y de los arcos de Neptuno —y los de los otros planetas gigantes— requerirá todavía muchos años; pero, ya ahora, la predicción de su duración se impone como la tarea más importante. El cálculo de las perturbaciones producidas por los diferentes satélites asociados a los anillos indica que la materia circumplanetaria, en tanto que objeto geológico, difícilmente ha podido sobrevivir a los cuatro mil quinientos millones de años del sistema solar. Sin embargo, es perfectamente posible imaginar escenarios que permitan «reaprovisionar» los anillos con el paso de los siglos.

Una ocasión de aprender más quizá la tengamos el próximo julio, con motivo de la colisión de un fragmento del cometa Shoemaker-Levy con Júpiter (véase *Mundo Científico*, nº 141, diciembre, 1993, p. 1001). ¿Asistiremos entonces al nacimiento de magníficos círculos alrededor del mayor planeta del sistema solar? ■

PARA MÁS INFORMACIÓN:

■ R. Greenberg y A. Brahic (eds.), *Planetary rings*, University of Arizona Press, 1984.

■ C.C. Porco *et al.*, «Neptune's ring system», *in Neptune and Triton*, D.P. Cruikshank y M.S. Matthews (eds.), University of Arizona Press, en prensa.

■ Para una bibliografía más completa véase la página 293.

(12) C.C. Porco, *Science, 253*, 995, 1991.

(13) D.W. Foryta, 1993, «Etude numérique des anneaux planétaires, application aux arcs de Neptune», tesis de doctorado, Observatorio de París.

EL ENFRIAMIENTO DE ÁTOMOS POR LÁSER

ALAIN ASPECT Y JEAN DALIBARD

DESDE HACE ALGUNOS AÑOS, LOS FÍSICOS LOGRAN CAPTURAR E INMOVILIZAR PEQUEÑAS NUBES DE ÁTOMOS POR MEDIO DE «MELAZAS ÓPTICAS» CONSTITUIDAS POR HACES LÁSER. EN ELLAS LOS ÁTOMOS PUEDEN ESTAR ANIMADOS DE VELOCIDADES TAN PEQUEÑAS COMO ALGUNOS CENTÍMETROS POR SEGUNDO, LO QUE CORRESPONDE A TEMPERATURAS DEL ORDEN DE LA MILLONÉSIMA DE GRADO ABSOLUTO. LA OBTENCIÓN DE ÁTOMOS TAN FRÍOS NO ES SÓLO UNA PROEZA TÉCNICA. TAMBIÉN ES EL RESULTADO DE UN MEJOR CONOCIMIENTO DE LA INTERACCIÓN ENTRE ÁTOMOS Y LUZ, Y DE LA DETECCIÓN DE EFECTOS NO PREVISTOS. DE ESTE MODO EL ENFRIAMIENTO DE ÁTOMOS POR LÁSER ABRE UNAS PERSPECTIVAS FASCINANTES, DESDE EL ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES CUANTITATIVAS DE LOS ÁTOMOS FRÍOS HASTA LA REALIZACIÓN DE RELOJES ATÓMICOS AÚN MÁS PRECISOS.

El láser se asocia a menudo a la idea de calor, ya que permite soldar, cortar, incluso destruir... Y sin embargo, desde hace algunos años se sabe utilizar la pureza de la luz láser para enfriar gases a temperaturas extraordinariamente bajas, algunas millonésimas de grado solamente por encima del cero absoluto (fig. 1). En efecto, utilizando adecuadamente la acción mecánica de la luz, se puede reducir la velocidad media de agitación de los átomos de un gas, de modo que esta velocidad pase de algunos centenares de metros por segundo (temperatura ambiente) a algunos centímetros por segundo.

Esta manipulación fina del movimiento de átomos por láser abre múltiples perspectivas, y más de un centenar de laboratorios del mundo se han lanzado a la carrera. Los desafíos se refieren, en primer lugar, a la física del frío que siempre ha reservado grandes sorpresas, como la superconductividad de algunos metales y la superfluidez del helio líquido. En un conjunto de átomos enfriados por láser, se trata de conocer, por ejemplo, el tipo de organización espacial que puede aparecer a unas temperaturas tan bajas. ¿Se solidificarán los átomos en un retículo regular o se condensarán de otras formas? Mientras se espera el resultado de los experimentos, se enfrentan previsiones contradictorias.

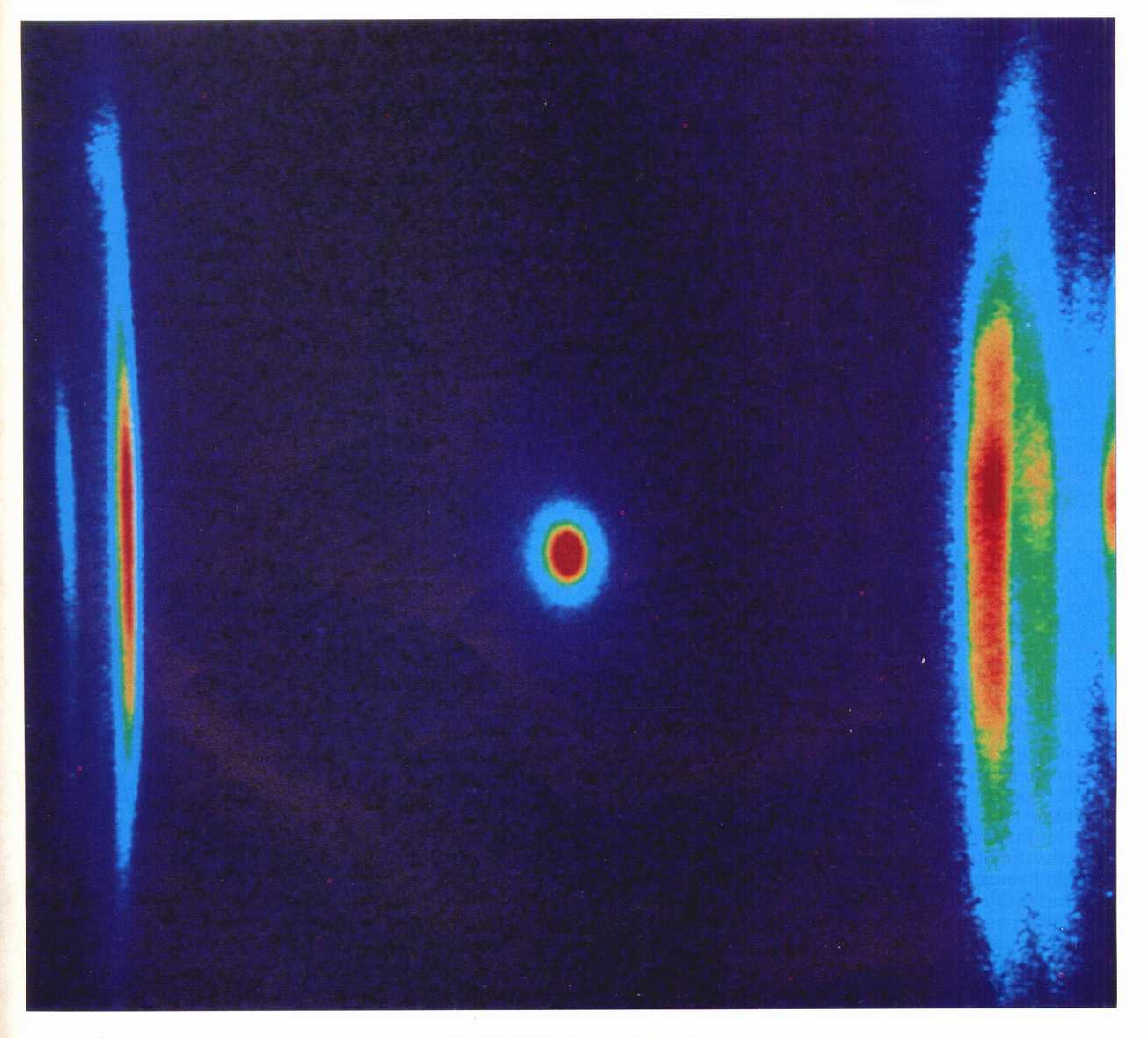
El enfriamiento láser también abre nuevos horizontes en otros campos de la física. Está naciendo así una nueva disciplina, la óptica atómica, ya que, como anunció a principios de siglo el físico francés Louis de Broglie, toda partícula tiene asociada una onda que se comporta en cierta medida como las ondas luminosas. La óptica atómica intenta intervenir sobre los átomos como la óptica tradicional permite hacerlo sobre la luz, por medio de espejos, lentes, interferómetros. Las ondas de materia asociadas a los átomos fríos pueden tener una gran longitud de onda, mucho mayor que el tamaño del átomo. Es decir, se pierde la noción de posición del átomo, que se diluye en extensiones importantes y sólo recupera su identidad de partícula cuando lo identifica un detector. Aunque los experimentos en los que las partículas se comportan como ondas no son nuevos, las primeras interferencias de sistemas compuestos y sin embargo fáciles de preparar, como los átomos, sólo hace muy poco que se han observado (véase «La óptica atómica», *Mundo Científico*, nº 130, diciembre, 1992). La perspectiva de utilizar átomos fríos para este tipo de experimentos apasiona a los investigadores ya que se podrán abordar nuevos campos todavía inexplorados, gracias al carácter ondulatorio reforzado de estos objetos.

La metrología también es un motor del desarrollo de estas investigaciones. En efecto, el átomo constituye la base de la medida del tiempo y de las longitudes. Los patrones de tiempo son relojes atómicos, en los que la oscilación de los electrones de átomos de cesio sustituye la del balancín de un reloj tradicional. Pero la precisión de un reloj atómico está limitada por el tiempo de permanencia de los átomos en el sistema de medida. Unos átomos enfriados por láser, casi en reposo, permiten largos tiempos de observación, que conducen a una mejora potencialmente espectacular de los patrones de tiempo que son los relojes atómicos.

La acción mecánica de la luz sobre los objetos materiales había sido presentida ya al principio del siglo XVII por Kepler. Explicaba así que si la cola de los cometas siempre se orienta hacia el lado opuesto al Sol, esto se debe a la presión ejercida por la luz solar sobre las partículas que componen esta cola. Aunque la explicación actual de este fenómeno es más compleja, este mecanismo basado en la presión de radiación ejercida por

la luz sobre las partículas materiales sigue siendo cualitativamente válida.
A una escala mucho más reducida, esta presión de radiación está también en la base de la mayoría de experimentos de manipulación de átomos por la luz: un átomo sometido a un haz láser es empujado en la dirección de propagación de este haz. La aceleración correspondiente puede alcanzar valores considerables -100 000 veces la aceleración de la gravedad en el caso del átomo de sodio sometido a la luz amarilla de longitud de onda de 589 nanómetros (una componente bien conocida del espectro del sodio). Esta fuerza es el resultado de la repetición de los retrocesos que sufre el átomo cada vez que absorbe un fotón. Un fotón posee una cantidad de movimiento que transfiere al átomo, provocando entonces una modificación de la velocidad atómica en la dirección del haz. Este cambio de velocidad por fotón absorbido, previsto por Einstein en 1917[1] y llamado velocidad de retroceso varía, según la naturaleza de los átomos, de algunos milímetros por segundo a algunos metros por segundo. El átomo también sufre un retroceso cuando reemite el fotón, llamado fotón de fluorescencia, después de cada absorción. Pero a diferencia de los retrocesos ligados a la absorción de fotones láser, que se superponen todos en la misma dirección, los retrocesos asociados a la emisión de los fotones de fluorescencia se producen en direcciones aleatorias; por tanto su suma es nula en promedio.
Para obtener una fuerza intensa, se trata entonces de repetir con la mayor frecuencia posible estos ciclos de fluorescencia, cada uno de los cuales comprende una absorción seguida de una reemisión. Para ello es necesario que la luz láser sea resonante con una transición atómica. En otras palabras, la frecuencia luminosa del láser se tiene que elegir de tal manera que la energía de un fotón sea igual a la diferencia de energía entre el nivel atómico fundamental,

Figura 1. La luz láser permite capturar y enfriar los átomos de un vapor hasta formar una nube densa en el centro de la trampa. En en centro de esta fotografía se ven, en falsos colores, átomos de helio así capturados por un láser infrarrojo en presencia de un campo magnético. Las espiras que crean este campo aparecen en los bordes de la foto. De este modo se capturan unos 100 000 átomos en un volumen de un milímetro cúbico. La temperatura de los átomos puede descender a algunas millonésimas de grado, lo que abre el camino a aplicaciones en relojes atómicos ultraprecisos y también podría estar en la base de nuevos descubrimientos en la física del frío. (Foto J.-N. Pignet.)



ALAIN ASPECT
es director de investigación en el CNRS y profesor en la Escuela politécnica. Hasta 1991 trabajó en el Grupo de enfriamiento de átomos por láser del laboratorio de espectroscopia hertziana de la Escuela normal superior de París y del Colegio de Francia. Desde 1992 dirige el grupo de óptica atómica del Instituto de óptica teórica y aplicada de Orsay.
JEAN DALIBARD
es director de investigación en el CNRS y profesor en la Escuela politécnica. Efectúa sus investigaciones en el laboratorio de espectroscopia hertziana de la Escuela normal superior.

ocupado por el átomo en ausencia de luz, y un nivel atómico excitado. En estas condiciones, con la suficiente intensidad luminosa, el átomo puede efectuar estos ciclos a una cadencia muy elevada. Ésta sólo está limitada por el tiempo durante el cual el átomo permanece en el nivel excitado antes de poder reemitir un fotón de fluorescencia, también llamado vida media del nivel atómico excitado. En la práctica, esta vida media es del orden de algunas cienmillonésimas de segundo, lo que permite unos ritmos de fluorescencia que pueden alcanzar decenas de millones de ciclos por segundo. La primera demostración de la acción de la luz sobre el movimiento de átomos libres consistió en observar la deflexión de un chorro de átomos por un haz de luz perpendicular al chorro. Este experimento fue realizado por R. Frisch en 1933, en Alemania, mucho antes de la invención de los láseres.(2) Frisch utilizaba un chorro de átomos de sodio, iluminado por una lámpara de descarga también de sodio, lo que le permitía satisfacer la condición de resonancia. Este resultado constituyó una de las primeras demostraciones experimentales de los intercambios de cantidad de movimiento entre luz y átomos predichos por Einstein.

El experimento de Frisch no dio lugar a ningún desarrollo en los cuarenta años siguientes, ya que la intensidad luminosa producida por una lámpara de descarga es muy insuficiente para manipular átomos de forma útil.

Al principio de los años 70, la aparición de los láseres de frecuencia ajustable abrió la vía a nuevos experimentos. En primer lugar, H. Walther y sus colegas, en Alemania Federal, así como P. Jacquinot y su equipo, en Orsay, Francia, lograron empujar eficazmente átomos con un láser en 1972-1973.(3,4) Pero pronto, los físicos intentaron hacer algo mejor que jugar al billar con átomos; idearon entonces unas operaciones más refinadas y más espectaculares que permiten controlar de manera muy fina la posición y la velocidad de los átomos. Los primeros frenadores de átomos fueron propuestos entre 1970 y 1975 por A. Ashkin, de los laboratorios Bell, por T. Hänsch y A. Schawlow, de la universidad de Stanford, y por D. Wineland y H. Dehmelt, en Seattle.(5,6,7) En la propuesta del grupo de Stanford, que es la más fácil de realizar con átomos neutros, se utilizan dos ondas láser idénticas, de igual potencia y de igual frecuencia, pero que se propagan en sentidos contrarios. Un átomo en reposo en esta configuración luminosa no experimenta ninguna fuerza. Hay un equilibrio perfecto entre las fuerzas debidas a la presión de radiación creadas por cada una de las ondas luminosas. En cambio, como vamos a ver, un átomo en movimiento en la dirección del eje de propagación de las ondas está sometido a una fuerza opuesta a su velocidad, a condición de que la frecuencia de las ondas luminosas se haya elegido ligeramente inferior a la frecuencia de resonancia atómica. El átomo es entonces frenado muy enérgicamente, y se detiene en un tiempo que depende de las características de las ondas luminosas y que puede ser inferior a la milésima de segundo. El átomo es literalmente encolado por los haces luminosos y se habla de «melaza óptica» (fig. 2).

Para comprender el origen de esta fuerza de fricción que frena al átomo, se tiene que invocar el efecto Doppler-Fizeau: cuando un objeto se mueve respecto a una onda ve la frecuencia de esta onda modificada. Si se va al encuentro de la onda, la frecuencia aumenta. Por el contrario si se desplaza en el mismo sentido que la onda, la frecuencia aparente disminuye. Volvamos al átomo colocado en las dos ondas láser de frecuencia inferior a la frecuencia de resonancia atómica; si este átomo se mueve, la frecuencia de la onda que va a su encuentro se acerca, para él, a la frecuencia de resonancia. Por tanto, los fotones son absorbidos más fácilmente y esta onda engendra entonces una presión de radiación mayor que la que actúa sobre un átomo inmóvil. En cambio, la fuerza creada por la onda que va en el mismo sentido que el átomo disminuye, ya que la frecuencia aparente de esta onda se aleja de la resonancia. Se rompe el equilibrio perfecto entre las dos fuerzas de

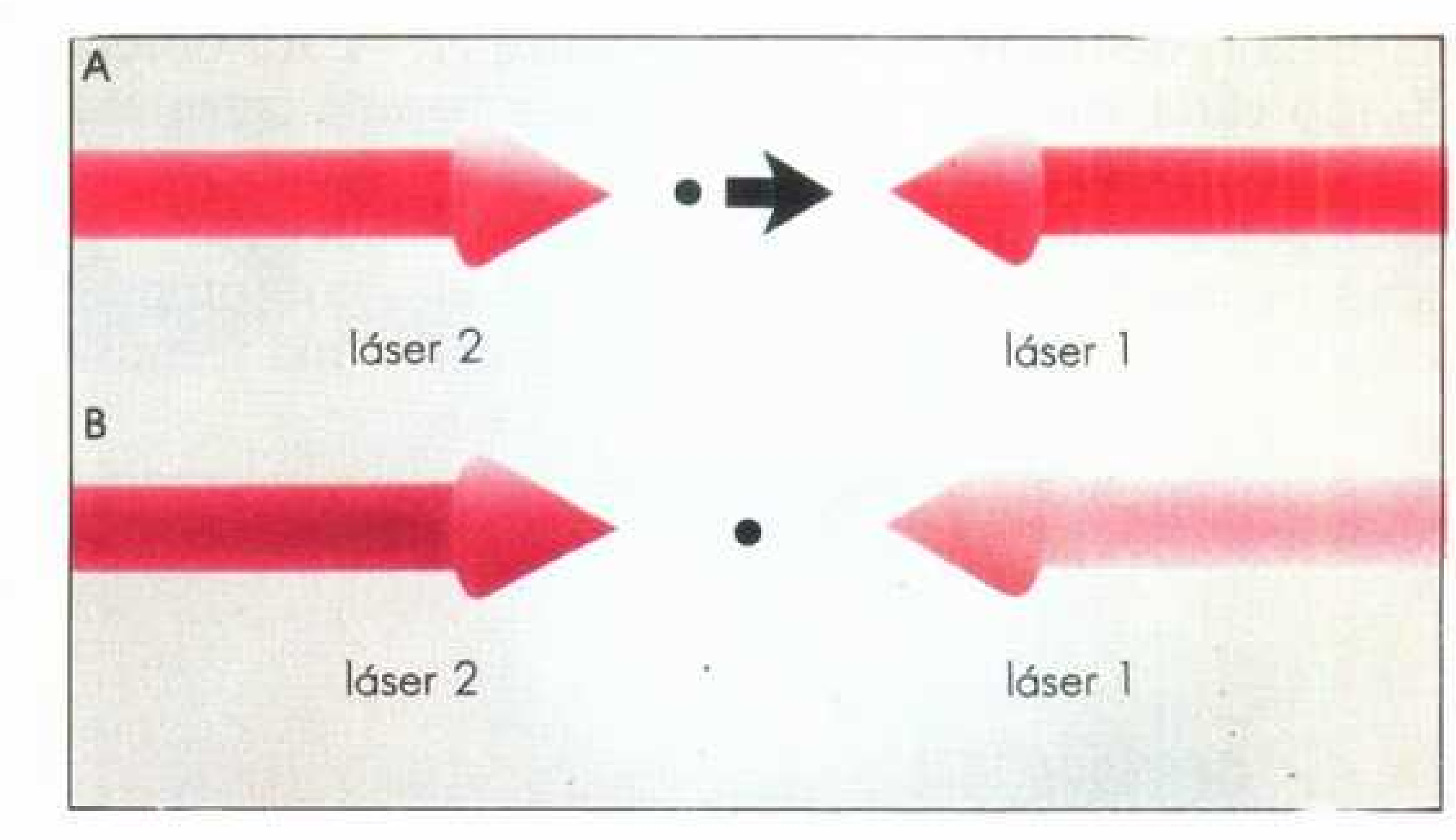


Figura 2. Uno de los primeros mecanismos propuestos para enfriar átomos con un láser utiliza la presión de radiación. El dispositivo comprende dos ondas de la misma frecuencia que se propagan en sentidos opuestos. Su frecuencia común tiene que ser ligeramente inferior a la frecuencia de la luz que puede absorber un átomo en reposo. Un átomo que se dirige hacia la derecha va al encuentro de la onda 1 y se aleja de la onda 2 (A). A causa del movimiento, se modifica la frecuencia de las ondas en el sistema de referencia del átomo por efecto Doppler-Fizeau. La onda 1 parece desplazada hacia las altas frecuencias, y se aproxima a la frecuencia atómica, mientras que la onda 2 parece desplazada hacia las bajas frecuencias y se aleja de la frecuencia atómica (B). Por tanto el átomo absorbe mucho más fácilmente fotones de la onda 1, que van a su encuentro y que lo frenan, que fotones de la onda 2. Por tanto, el átomo en movimiento hacia la derecha resulta frenado. Repitiendo el razonamiento para un átomo que va hacia la izquierda y que absorbe más fácilmente la onda 2, se ve que este átomo también resulta frenado. Éste es el fundamento del «enfriamiento Doppler».

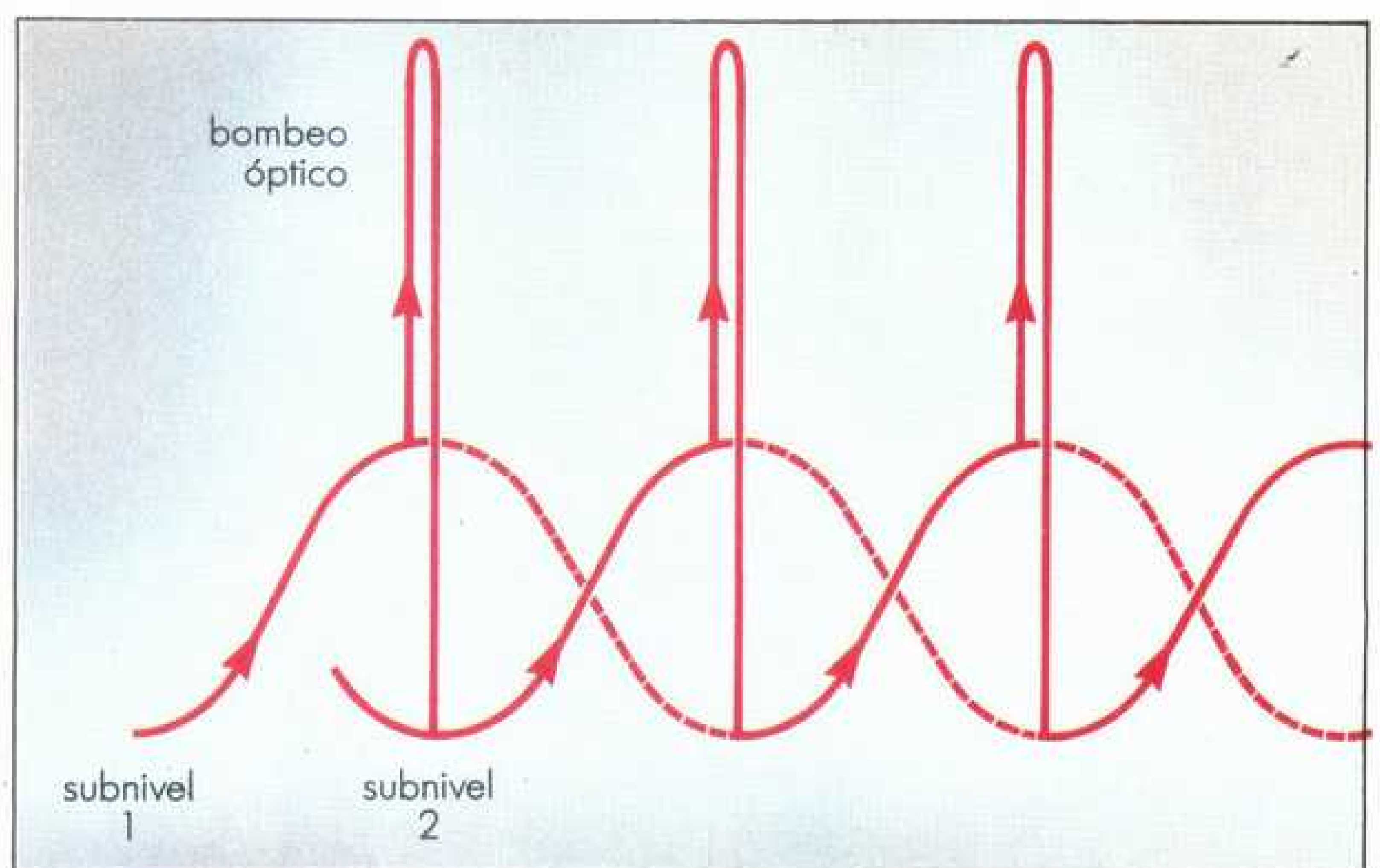


Figura 3. Para explicar las temperaturas anormalmente bajas que obtenían por lo que habían creído primero que era un enfriamiento Doppler, los investigadores de la Escuela normal superior y del Colegio de Francia han encontrado otro mecanismo, llamado efecto Sísifo. La onda luminosa estacionaria constituye para el átomo una sucesión de colinas y valles que tiene que subir y bajar. La particularidad de este relieve de energía es que depende del subnivel en el que se encuentra el átomo; por ejemplo, el subnivel 1 de la figura tiene colinas cuyas cumbres coinciden con el fondo de los valles del subnivel 2. Al encontrarse en el subnivel 1, el átomo tiene que superar la pendiente que se le enfrenta. Una vez a llegado a la cima, tiene muchas probabilidades de absorber un fotón del láser en vez de descender la pendiente por el otro lado. Cuando reemite un fotón de fluorescencia, tiene una alta probabilidad de encontrarse en el subnivel 2, que en este lugar presenta un valle. Al átomo no le queda más que subir la pendiente hasta la cima siguiente. Al perder siempre energía cinética, el átomo termina por quedar bloqueado en el fondo de un valle. El mecanismo de enfriamiento Sísifo permite alcanzar temperaturas mucho más bajas que el enfriamiento Doppler.

presión de radiación en beneficio de la fuerza que se opone a la velocidad del átomo: es el efecto de melaza óptica anunciado. De hecho, como veremos más adelante, este «enfriamiento Doppler» no es más que uno de los numerosos mecanismos que permiten frenar átomos por medio de la luz.

La melaza óptica tendría un interés limitado si sólo consiguiese frenar a un átomo en una única dirección en el espacio. Pero, muy afortunadamente, el principio se generaliza directamente a tres dimensiones: se tiene que disponer de tres pares de haces láser en la dirección de tres ejes ortogonales, de forma que se amortigüen las velocidades en las tres direcciones del espacio. De este modo el átomo queda frenado sea cual sea la dirección que tome. Este frenado equivale a un enfriamiento del conjunto de los átomos. En efecto, la melaza calma la agitación térmica y la temperatura de los átomos disminuye; la melaza los hiela literalmente en el lugar. La primera melaza óptica fue realizada en los Laboratorios Bell en 1985 por A. Ashkin, S. Chu y su equipo.[8] Los átomos se inyectaban por medio de un chorrro atómico previamente frenado por un haz láser anexo. Estos átomos frenados llegaban a la melaza con una velocidad del orden de veinte metros por segundo, y entonces eran capturados. Las ondas láser utilizadas tenían un diámetro del orden del centímetro, y la zona de melaza así delimitada, correspondiente a la intersección de los tres pares de ondas, tenía un volumen del orden del centímetro cúbico.

En este dispositivo los átomos se enfrían, pero ¿permanecen fríos por mucho tiempo? En otras palabras, ¿cuánto tiempo permanece un átomo así encolado en los haces láser? En el marco de la descripción precedente, se podrían esperar tiempos de permanencia muy largos, ya que la fuerza de fricción tendría que llevar a los átomos a una velocidad nula. De hecho, este reposo absoluto es imposible ya que los fenómenos de absorción y de fluorescencia hacen que los átomos sufran una sucesión ininterrumpida de retrocesos. En otras palabras, la fuerza descrita más arriba sólo es una fuerza media. Debido a los fotones de fluorescencia, emitidos al azar en todas direcciones, la fuerza real que experimenta un átomo fluctúa en torno a este valor medio. Esto representa una agitación residual, que corresponde a un calentamiento de los átomos. Por tanto, los átomos efectúan un movimiento browniano errático en la melaza; y terminan por escapar cuando su trayectoria alcanza el borde de la melaza, lo que sucede al cabo de algunos segundos.

Para alargar el tiempo de cónfinamiento, uno de nosotros (J.D.) sugirió, en 1986, superponer un campo magnético estático a la melaza (véase el recuadro 1). Se demuestra que este campo modifica la presión de radiación que entonces engendra, además de la fuerza de fricción, una fuerza de retroceso que tiende a llevar a los átomos hacia el centro de la melaza. El experimento correspondiente fue efectuado un año más tarde por una colaboración entre el grupo de D. Pritchar del MIT y el de los laboratorios Bell.[9] Ahora se dispone de una «trampa magnetoóptica» que permite conservar los átomos frenados durante un tiempo limitado únicamente por las colisiones con las moléculas del gas residual en el recinto de vacío. De este modo son accesible tiempos de confinamiento del orden de varios minutos.

Tras esta primera demostración, numerosos laboratorios se lanzaron a la realización de trampas magnetoópticas. El método fue notablemente simplificado en 1989 por C. Wieman y su equipo de la universidad de Colorado, en la que una trampa de este tipo funcionó en el interior de una célula de vidrio llenada, a baja presión, con el gas que se intenta manipular.[10]

El número de átomos capturados en una trampa magnetoóptica varía de algunos centenares a más de cien millones, como resultado del equilibrio entre los nuevos átomos capturados sin cesar y los átomos eyectados fuera de la trampa a causa de las colisiones. La nube atómica así formada tiene un diámetro que varía entre 0,1 mm y algunos milímetros. La luz láser difundida por los átomos capturados hace que esta nube sea claramente visible, a simple vista o por medio de una cámara infrarroja, según la longitud de onda luminosa utilizada (fig. 1) ¿Qué especies atómicas han capturado los investigadores? La elección está limitada a los átomos en los que existe una transición entre el estado fundamental y un estado excitado, cuya longitud de onda corresponda a la de un láser fácilmente disponible. Así, se han podido capturar átomos alcalinos, como el sodio, el rubidio y el cesio, o átomos alcalinotérreos como el magnesio y el calcio. También se han capturado átomos de gases nobles, especialmente de helio. Sin embargo, en este último caso, los átomos no se pueden utilizar en su estado fundamental, ya que los láseres necesarios para manipular al átomo tendrían que tener una longitud de onda en el ultravioleta lejano, fuera del alcance de la tecnología actual. De hecho estos átomos se llevan previamente a un nivel metastable por medio de una descarga eléctrica o por colisión con un haz de electrones. Este nivel metastable, de muy larga vida media, desempeña el papel del estado fundamental en la descripción precedente.

1

La trampa magnetoóptica

Para capturar los átomos enfriados por láser, se aplica un campo magnético estático en la zona de melaza óptica. Este campo, producido por dos bobinas recorridas por corrientes de sentidos opuestos, es nulo en el centro de la melaza. Su intensidad aumenta con la distancia a este punto central y, en dos puntos simétricos respecto al centro, los campos tienen sentidos opuestos. Además, las polarizaciones de los haces luminosos que constituyen la melaza se eligen circulares, con sentidos de rotación opuestos en las dos ondas que se enfrentan (fig. 6). En esta configuración, los fenómenos de resonancia entre el átomo y la luz están regidos por el efecto Zeeman: dependen de la polarización de las ondas luminosas y del campo magnético en el lugar donde se encuentra el átomo. Así, para las orientaciones de las polarizaciones y del campo indicadas en la figura 6, un átomo situado a la derecha del centro está más en resonancia con la onda que viene de la derecha que con la que viene de la izquierda. Por tanto, está sometido a una fuerte presión de radiación resultante que lo empuja hacia el centro.

Más en general, en la geometría aquí considerada, la fuerza debida a la presión de radiación se dirige en todos los puntos hacia el interior de la melaza.

LAS TRAMPAS LUMINOSAS PERMITEN ALCANZAR UNAS TEMPERATURAS AÚN MÁS BAJAS QUE LAS QUE SE ESPERABAN

■

Los átomos capturados tendrían que ser la fuente de mejoras espectaculares en metrología (reloj de cesio) y en espectroscopia, en particular de átomos «exóticos». Así, varios equipos, especialmente en Los Álamos, han empezado intentar a realizar experimentos de captura de átomos cuyo núcleo es radiactivo. En este caso, se podría determinar la estructura de especies atómicas extremadamente raras producidas en los grandes aceleradores de partículas. El enfriamiento y la captura láser ofrecen la posibilidad de acumularlos y de observarlos durante largos periodos. Un candidato para esta «nueva espectroscopia» es, por ejemplo, el francio, interesante por su elevado número atómico (87) que haría de él un buen átomo de prueba de las teorías unificadas de las interacciones, como la teoría electrodébil.

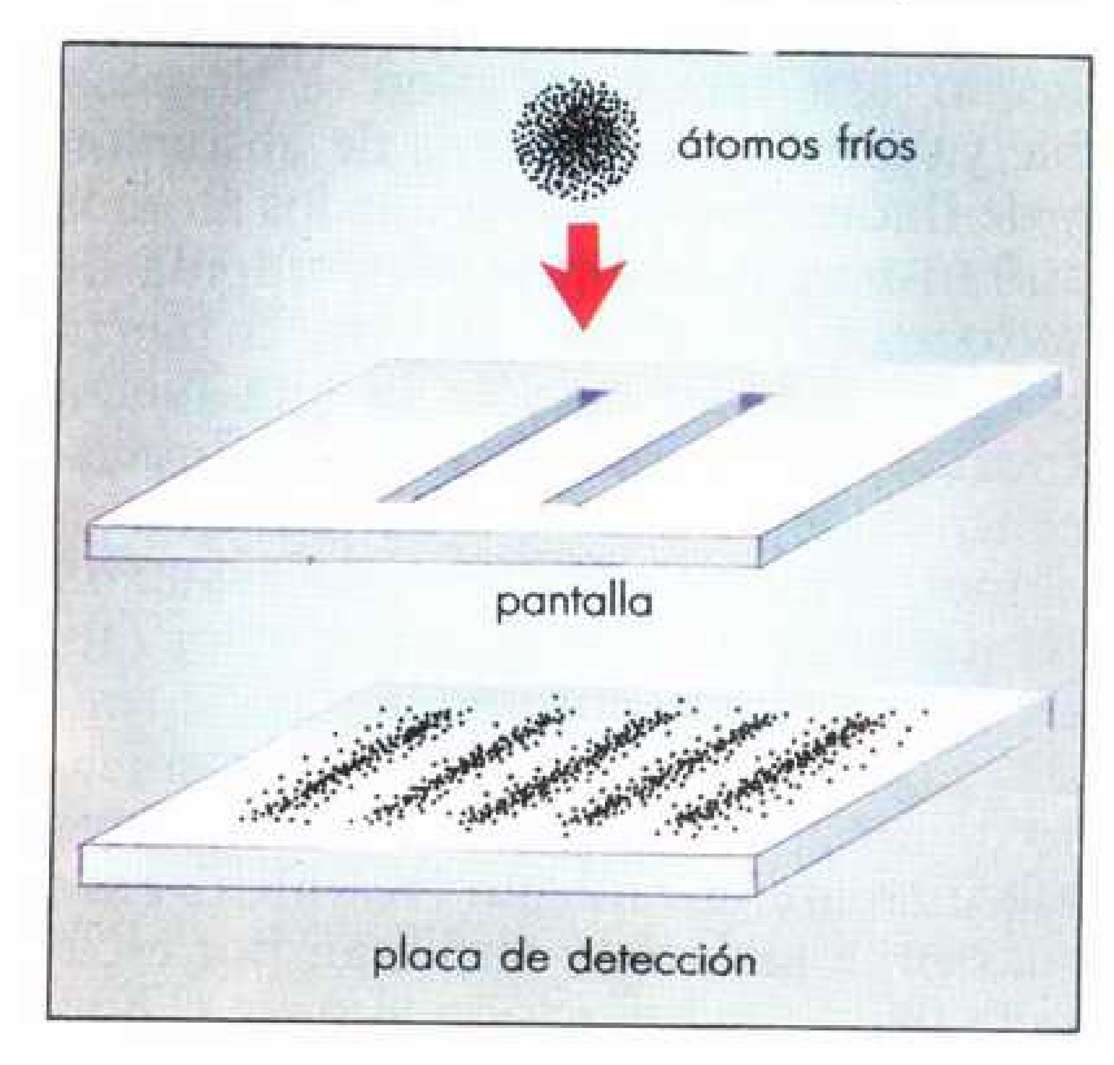
De otra parte, incluso con las especies atómicas usuales, una trampa luminosa proporciona un medio inhabitual. En ella los efectos colectivos pueden tener un carácter muy particular, a causa de la elevada densidad, de las pequeñas velocidades y de la presencia de luz láser casi resonante. Por esto, la invención de

(1) A. Einstein, *Phys. Zeit.*, *18*, 1917, p. 121.
(2) R. Frisch, *Z. Phys.*, *86*, 42, 1933.
(3) R. Schieder e. *al.*, *Opt. Commun.*, *5*, 337, 1972.
(4) P. Jacquinot *et al.*, *Opt. Commun.*, *8*, 163, 1973.
(5) A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.*, *24*, 156, 1970.
(6) T. Hänsch y A. Schawlow, *Opt. Commun.*, *13*, 68, 1975.
(7) D. Wineland y H. Dehmelt, BAPS, *20*, *637*, 1975.
(8) S. Chu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *55*, 48, 1985.
(9) E. Raab *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *59*, 2631, 1987.
(10) C. Monroe *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *65*, 1571, 1990.

las trampas luminosas ha estimulado la emergencia de una nueva línea de investigación: las colisiones de átomos ultralentos.

Igualmente apasionantes son las perspectivas abiertas sobre las muy bajas temperaturas. Los átomos capturados tienen una velocidad de agitación muy pequeña, del orden de algunos centímetros por segundo, mientras que la velocidad media de los átomos a la temperatura ambiente es de varios centenares de metros

Figura 4. Los átomos enfriados por láser tienen unas propiedades ondulatorias muy marcadas que se pueden poner de manifiesto, como con la luz, con experimentos de interferencia. Uno de ellos, realizado en 1992 por unos investigadores de la universidad de Tokyo,[25] consiste en dejar caer los átomos capturados por una melaza óptica sobre una pantalla perforada por dos estrechas rendijas (rendijas de Young) y luego en observar los puntos de impacto de los átomos en una placa situada por debajo de las rendijas. Los puntos de impacto no se distribuyen uniformemente, sino que por el contrario se sitúan siguiendo líneas paralelas a las rendijas, con zonas de elevada tasa de impacto alternadas con zonas sin impactos. Estas franjas de interferencia son análogas a las de una onda luminosa en las mismas condiciones.



por segundo. Por consiguiente, la temperatura de la nube óptica capturada, que es proporcional al cuadrado de la velocidad media de los átomos, es tan sólo de algunos microkelvin. Se llega así a un valor cien millones de veces más bajo que la temperatura ambiente (que es de unos 300 kelvin).

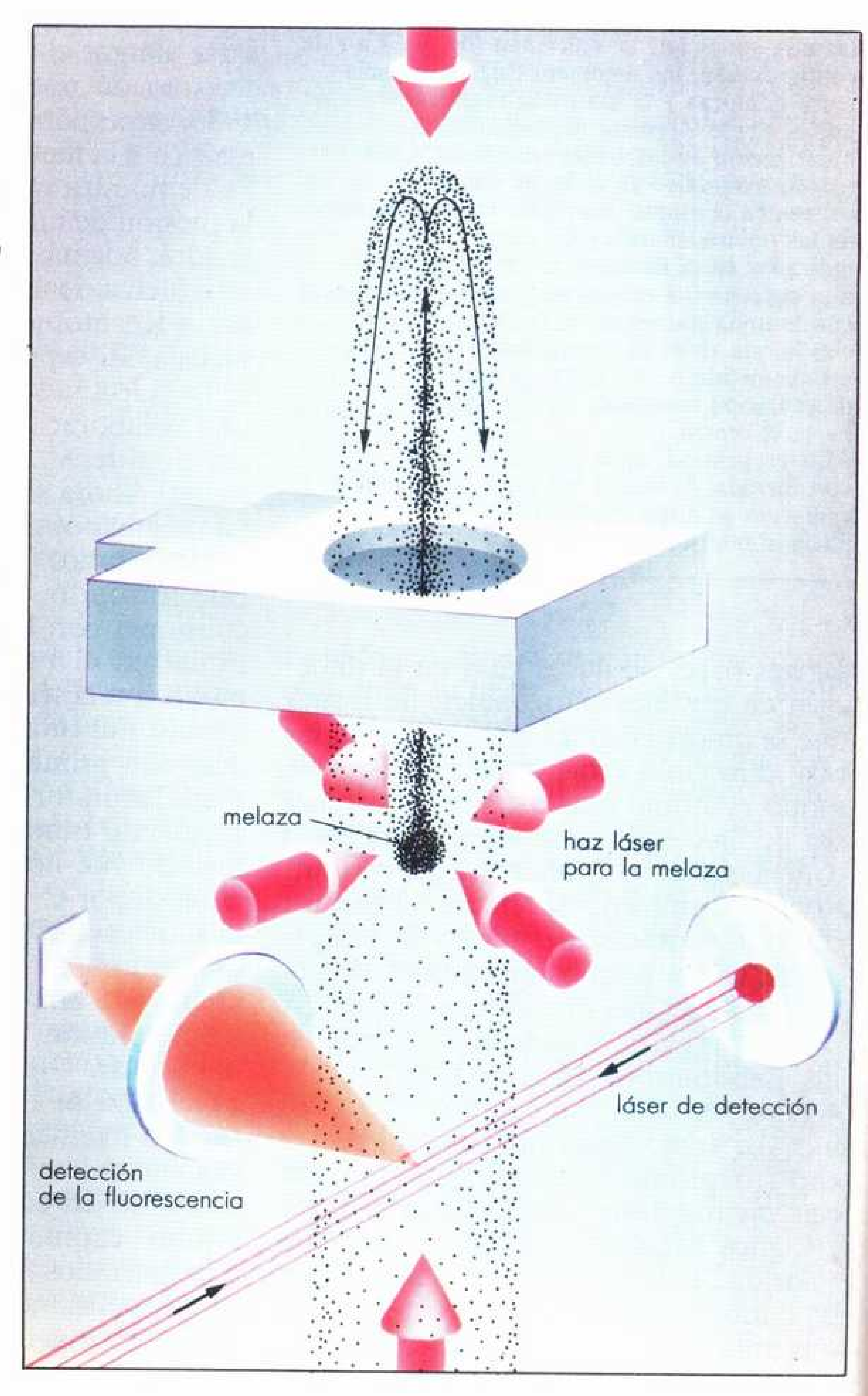
La medida de temperaturas tan pequeñas no se puede realizar con los medios termométricos habituales. Pasa a través de una medición de la velocidad de agitación de los átomos enfriados. Por ejemplo, en un instante dado se liberan estos átomos apagando de repende los haces láser de la melaza, y se miden los tiempos que tardan en caer hasta un detector situado algunos centímetros por debajo de la trampa. Si la temperatura fuese rigurosamente nula, todos los átomos tardarían el mismo tiempo en caer desde la melaza hasta el detector. Debido a la agitación residual, los átomos parten con distintas velocidades iniciales, lo que provoca una dispersión de los tiempos de caída. La temperatura se calcula a partir de la dispersión de estos tiempos de caída.

Los progresos experimentales en la medida de las temperaturas del gas capturado han tenido múltiples repercusiones, obligando a los teóricos de este campo a revisar el modelo del enfriamiento Doppler presentado más arriba. Con este modelo, los físicos de Boulder (Colorado, Estados Unidos) D. Wineland y W. Itano habían demostrado, en 1979, que se podía esperar alcanzar unas temperaturas extraordinariamente bajas, del orden de 240 microkelvin en el caso del átomo de sodio.[11] Esta perspectiva había desencadenado a partir de 1985 una serie de experimentos. Ya en las primeras medidas, realizadas en 1986 en los laboratorios Bell, se alcanzó la temperatura límite prevista. Intrigados por los notables rendimientos obtenidos en un experimento en definitiva preliminar, W. Phillips y su grupo del National Bureau of Standards de Washington reanudaron las mediciones de forma más sistemática.[12] En 1988 se impuso la conclusión: las temperaturas efectivamente alcanzadas podían ser todavía mucho más bajas que el límite teórico del enfriamiento Doppler. En el caso del sodio por ejemplo, el resultado experimental era diez veces mejor que el previsto.

Esto era una prueba de que en las melazas ópticas intervienen unos mecanismos de enfriamiento más eficaces que el enfriamiento Doppler. La identificación de estos nuevos macanismos no se hizo esperar. Algunos meses después del descubrimiento del equipo de Washington, Claude Cohen-Tannoudji y Jean Dalibard del Colegio de Francia y de la Escuela normal superior de París, así como Chu y su equipo de la universidad de Stanford, propusieron varios nuevos esquemas de enfriamiento.[13,14]

El punto común de estos nuevos esquemas reside en que tienen en cuenta otro efecto mecánico de la luz, independiente de los ciclos de fluorescencia y complementario de la presión de radiación. La onda luminosa constituye para el átomo un verdadero relieve, una sucesión de colinas y valles que tiene que subir y bajar. El átomo en movimiento se compor-

Figura 5. En una fuente atómica, una melaza captura los átomos de cesio y los enfría. Una vez capturados los átomos, se cambia la frecuencia de los láseres verticales, lo que produce una «melaza en movimiento» hacia arriba. Los átomos así propulsados penetran entonces en una cavidad, sede de campos electromagnéticos que provocan una transición entre los dos subniveles de energía llamados hiperfinos de los átomos. Luego, durante su caída, los átomos pasan por un haz láser anexo situado debajo del montaje. Este láser está ajustado de tal forma que sólo los átomos que han efectuado una transición entre los dos subniveles hiperfinos son excitados hacia un nivel más elevado y producen a continuación la fluorescencia. La variación rápida de la señal de fluorescencia con la frecuencia del campo en la cavidad ha permitido que A. Clairon, C. Salomon y su equipo realicen una determinación muy precisa de la frecuencia correspondiente a la transición hiperfina, que constituye la base de la definición del segundo.



ta como una bola sobre una plancha ondulada: frena o acelera según que suba o que descienda una colina de energía, ya que su energía mecánica total, suma de la energía cinética y de la energía potencial, permanece constante (fig. 3). ¿De dónde viene este relieve? Su origen es la energía potencial, dipolar debida al acoplamiento entre el campo electromagnético de la onda luminosa y los electrones atómicos. Esta energía dipolar, proporcional a la intensidad luminosa, se puede interpretar como un desplazamiento del nivel de energía fundamental del átomo. Su existencia fue predicha y luego demostrada experimentalmente por J.-P. Barrat y C. Cohen-Tannoudji en 1961.[15] En el caso de las melazas ópticas, a causa de las interferencias entre las diversas ondas láser, la energía dipolar está modulada en el espacio con una periodicidad del orden de la longitud de onda.

Lo que hace que el comportamiento de un átomo de sodio sea más sutil que el de una bola, es que este átomo, en su estado fundamental, posee varios subniveles. A cada uno de estos subniveles está asociada una energía potencial diferente: por tanto, el movimiento del átomo depende del subnivel en el que se encuentra. Pero un átomo no permanece indefinidamente en un mismo subnivel: puede saltar de un subnivel a otro en un ciclo de fluorescencia, es decir, una absorción de un fotón láser seguida de una emisión espontánea. Este efecto, descubierto y estudiado por los franceses A. Kastler y J. Brossel al principio de los años 1950, es un bombeo óptico del subnivel de partida al subnivel de llegada.

El enfriamiento a la baja de las temperaturas ultrabajas observadas en las melazas ópticas saca partido de la combinación del bombeo óptico y de la variación espacial de la energía potencial dipolar. Un átomo en movimiento se desacelera cuando sube una colina de potencial asociada al subnivel en el que se encuentra. Una vez llegado a la cumbre, en vez de acelerar en la siguiente bajada, el átomo es bombeado a otro subnivel que tiene un valle de potencial en este lugar, y luego escala una nueva colina, sufriendo así un nuevo frenado. El enfriamiento cesa cuando el átomo ya no tiene suficiente energía para subir las colinas, y permanece capturado en el fondo de los valles. Este nuevo mecanismo de enfriamiento, complementario del enfriamiento Doppler, se ha llamado efecto Sísifo, ya que el átomo en movimiento en una melaza óptica está en la situación de este héroe de la mitología griega, eternamente condenado a subir hasta la cumbre de una montaña una roca que vuelve a caer al fondo del valle en cuanto llega a la cumbre.

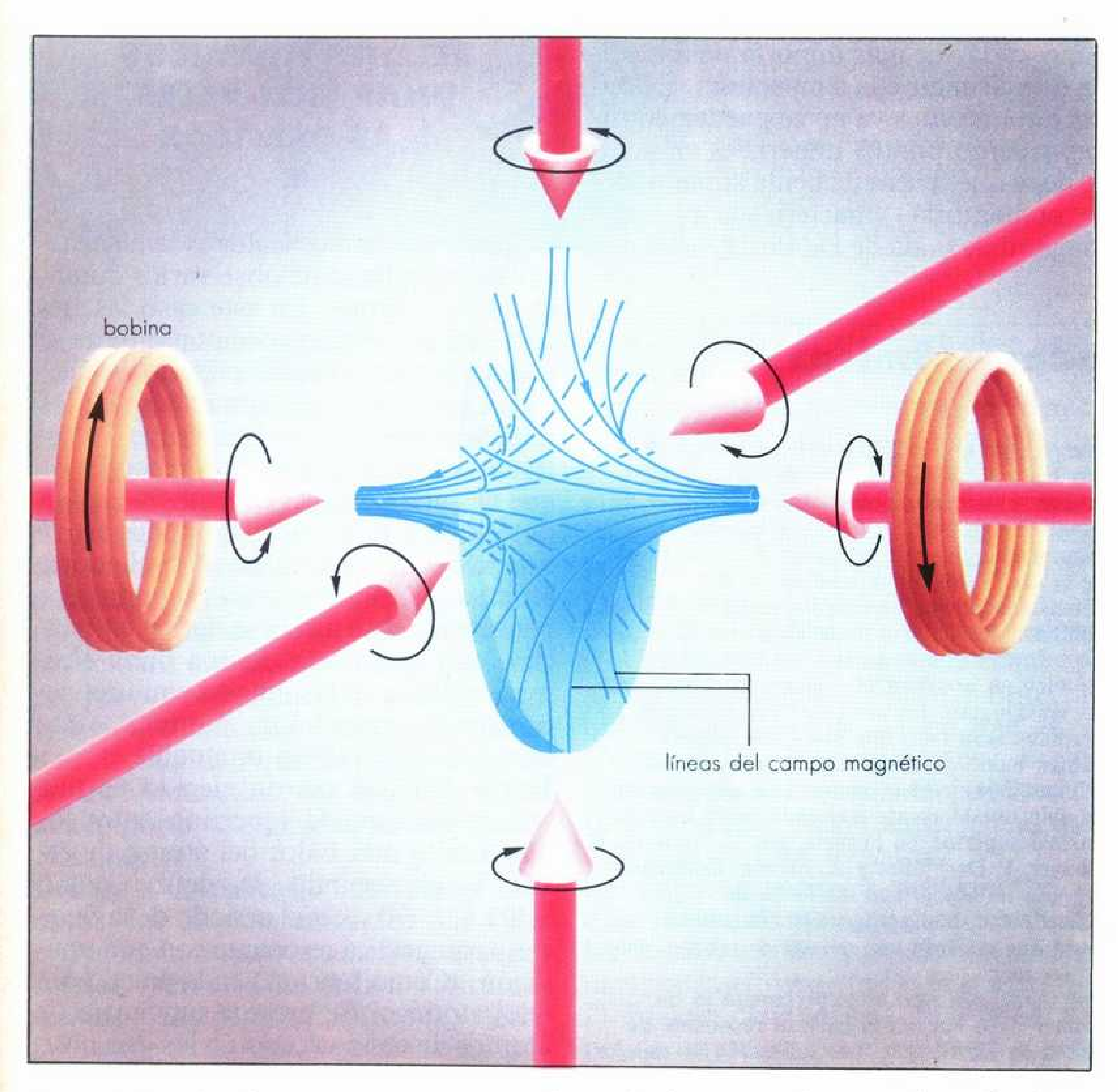


Figura 6. Añadiendo un campo magnético a las ondas láser, no sólo se pueden enfriar los átomos, sino también capturarlos. Esta trampa magnetoóptica está constituida por tres pares de haces láser que se propagan en sentidos opuestos en las tres direcciones del espacio, con polarizaciones circulares, y por dos bobinas recorridas por corrientes eléctricas con sentidos opuestos que producen el campo magnético. En estas condiciones, se demuestra que a la fuerza de fricción que frena a los átomos, se añade una fuerza de retroceso que los dirige hacia el centro de la trampa.

SE PUEDEN CREAR MELAZAS ÓPTICAS EN LAS QUE LOS ÁTOMOS SE COLOCAN EN LUGARES REGULARMENTE ESPACIADOS

■

La imagen que se tiene ahora de la melaza óptica es la de una red ordenada de átomos distribuidos en el fondo de los pozos de potencial creados por la onda láser. Esta imagen ha sido confirmada por estudios teóricos avanzados y por experimentos recientes, realizados por Y. Castin, J.-Y. Courtois, G. Grynberg, B. Lounis, C. Salomon y P. Verkerk en la Escuela normal superior de París, por W. Phillips, C. Westbrook y su equipo en la universidad de Washington y por T. Hänsch y A. Hemmerich en el Max Planck Institut de Munich.[16,17,18,19] Estos experimentos han consistido en analizar la luz absorbida y emitida por los átomos capturados en el fondo de los pozos de potencial (véase «Una matriz de luz para ordenar átomos», *Mundo Científico*, nº 139, octubre, 1993). Las densidades atómicas que se pueden lograr actualmente siguen siendo pequeñas, alrededor de un átomo por micrómetro cúbico, y sólo una pequeña fracción de los pozos, del orden del 10 % está ocupada. Pero uno de los objetivos de los equipos que trabajan en este campo es alcanzar situaciones en las que varios átomos estarían presentes en el mismo lugar de la red creada por la luz. Los efectos colectivos susceptibles de aparecer entonces proporcionarían una preciosa información sobre las interacciones entre los diferentes átomos.

Muy eficaz, el enfriamiento Sísifo puede conducir a una agitación residual muy inferior a las velocidades obtenidas por el enfriamiento Doppler. Pero hay un límite: el átomo capturado en el fondo de su pozo nunca está totalmente inmóvil. Todavía se agita un poco y la velocidad que mantiene proviene de los retrocesos sufridos al emitir sus últimos fotones de fluorescencia.

El efecto Sísifo permite acercarse al límite que constituye el retroceso que sufre un átomo al absorber o al emitir un

(11) D. Wineland y W. Itano, *Phys. Rev. A, 20*, 1521, 1979.
(12) P. Lett *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *61*, 169, 1988.
(13) J. Dalibard y C. Cohen-Tannoudji, JOSA, *B6*, 2023, 1989.
(14) P.J. Ungar et al., JOSA, B6, 2058, 1989.
(15) J.P. Barrat y C. Cohen-Tannoudji, *J. Phys. Rad.*, *22*, 329 y 443, 1961.
(16) Y. Castin y J. Dalibard, *Europhys. Lett.*, *14*, 761, 1991.
(17) P. Verkerk *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *68*, 3864, 1992.
(18) P. Jessen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *69*, 48, 1992.
(19) A. Hemmerich y T.W. Hänsch, *Phys. Rev. Lett.*, *70*, 410, 1992.
(20) A. Aspect *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *61*, 826, 1988.
(21) M. Kasevich y S. Chu, *Phys. Rev. Lett.*, *69*, 1741, 1992.
(22) A. Clairon *et al.*, *Europhys. Lett.*, *16*, 165, 1991.
(23) B. Lounis *et al.*, *C.R. Acad. Sci. Paris, 316*, II, 739, 1993.
(24) M.A. Kasevich *et al.*, *Opt. Letters, 15*, 607, 1990.
(25) F. Shimizu *et al.*, *Phys. Rev. A*, *46*, 1917, 1992.
(26) H. Wallis *et al.*, *Appl. Phys. B*, *54*, 407, 1992.

fotón. Este límite, la velocidad de retroceso, aparece de forma natural en todo enfriamiento láser en el que intervienen fotones de fluorescencia, cuya dirección e instante de emisión son aleatorios e incontrolables.
La generalidad del argumento podría hacer pensar que este límite es infranqueable. Pero, como ha demostrado el equipo de la Escuela normal superior, es posible sortearlo utilizando un concepto radicalmente distinto.[20] En este método, la «captura coherente de poblaciones selectiva en velocidad» puesto a punto en 1988 por E. Arimondo, A. Aspect, C. Cohen-Tannoudji, R. Kaiser y N. Vansteenkiste, no se intenta controlar la velocidad de los átomos reduciéndola por un mecanismo de fricción. Se deja que esta velocidad evolucione aleatoriamente a causa de las absorciones y de las emisiones de fotones, pero se elige una transición atómica y una configuración de haces láser tales que un átomo deje de interaccionar con la luz cuando su velocidad se anula: no absorbe ni emite ningún fotón y permanece por tanto inmóvil. En estas condiciones, la fracción de átomos en las proximidades de la velocidad nula aumenta poco a poco, alimentada por los átomos que han alcanzado casualmente la velocidad cero durante su evolución aleatoria.
El experimento de París de 1988, realizado con átomos de helio, permitió demostrar la validez de este principio, ya que la velocidad de agitación atómica se redujo efectivamente por debajo de la velocidad de retroceso. Luego, un método basado en un principio parecido ha sido confirmado por L. Chu y M. Kasevich.[21] De hecho, estos dos experimentos sólo se referían a una dirección de la velocidad, ya que no se enfriaban las otras dos componentes. Muy recientemente, cada uno de los dos equipos ha generalizado su método a dos dimensiones, y A. Aspect, F. Bardou, C. Cohen-Tannoudji, J. Lawall, B. Saubamea y K. Shimizu han obtenido unos resultados muy alentadores, de una parte en Stanford y de otra en París.
Al disponer de un nuevo proceso de enfriamiento, hay que plantearse una vez más el problema de la temperatura límite. De hecho, los análisis teóricos parecen indicar que en esta configuración se puede obtener una temperatura tan baja como se quiera: la temperatura tiende a cero a medida que aumenta el tiempo de interacción entre los átomos y el láser. En la práctica, las dificultades son considerables, ya que cada vez se tienen que eliminar mejor las imperfecciones experimentales. Pero las perspectivas abiertas son fascinantes ya que el carácter cuántico de los átomos desempeña un papel cada vez más importante a medida que disminuye la temperatura. Entonces estos átomos ya no se pueden considerar como puntos materiales clásicos; se tiene que tener en cuenta su naturaleza ondulatoria, caracterizada por una longitud de onda de De Broglie cada vez mayor. Para átomos enfriados hasta el límite de retroceso ésta ya alcanza el micrómetro y es diez mil veces mayor que el tamaño de un átomo.
Este carácter cuántico aparece en particular cuando la onda de De Broglie que describe el movimiento atómico tiene un tamaño superior al tamaño de los obstáculos que encuentra. Así, cuando una onda de materia muy extendida transversalmente cae sobre una pantalla perforada por dos rendijas, se está en una situación en la que el átomo «pasa por las dos aberturas a la vez» y pueden aparecer entonces franjas de interferencia (fig. 4). Los primeros experimentos de interferometría atómica se realizaron en 1991. Demostraron que el fenómeno de interferencia, bien conocido en el caso de partículas elementales como los fotones y los electrones, también existe con objetos tan complejos como átomos; se trata sin duda de los objetos más grandes que jamás han interferido (véase «La óptica atómica», *Mundo Científico*, nº 130, diciembre, 1992).

LOS ÁTOMOS LENTOS SERVIRÁN PARA REALIZAR RELOJES ATÓMICOS UNAS CIEN VECES MÁS PRECISOS

■

Disponer de átomos lentos es también tener la posibilidad de observarlos durante mucho tiempo. En este caso las frecuencias de las transiciones atómicas se pueden medir con más precisión. Tenemos aquí la clave de una mejora de los relojes atómicos, que constituyen la referencia actual de tiempo. Recordemos que después de haber definido la unidad de tiempo a partir de magnitudes astronómicas, ahora se utilizan osciladores atómicos como referencia absoluta. Por convenido, el segundo se define en relación con el periodo de una onda electromagnética en resonancia con una determinada transición atómica, que constituye un patrón inmutable.
Desde 1967, el patrón elegido es una transición llamada hiperfina entre los dos niveles más bajos del átomo de cesio, y el segundo se define como 9 192 631 770 veces el periodo de la onda electromagnética resonante con esta transición. ¿Cómo funciona en la práctica un reloj atómico? Se prepara un chorro de átomos de cesio en uno de los dos niveles que intervienen en la definición de 1967. Se hace que estos átomos interaccionen con una onda electromagnética, y se observa si los átomos han realizado una transición al otro nivel. Se ajusta entonces la frecuencia de la onda de modo que sea máximo el número de átomos

2

Los espejos y las cavidades atómicas

El control del movimiento de los átomos por láser permite realizar cavidades atómicas. La más sencilla de estas cavidades comporta un único espejo de átomos, cóncavo y dirigido hacia arriba. Los átomos, soltados sin velocidad inicial por encima del espejo caen sobre él y rebotan como un saltador en un trampolín. De este modo se dispone de una caja que permite, en un volumen reducido, convervar durante mucho tiempo átomos que sólo son perturbados durante el rebote, es decir, durante una fracción muy pequeña del tiempo de permanencia. Además del interés metrológico que presentan estos largos tiempos de almacenamiento, los físicos ven en tales cavidades la posibilidad de obtener modos de ondas de De Broglie atómicas: al igual que los fotones que rebotan entre dos espejos sólo quedan capturados si tienen unas determinadas longitudes de onda, un átomo en un estado estacionario de esta cavidad tiene una energía bien determinada; está entonces en un modo de la cavidad. De este modo, se puede esperar reproducir, con estas cavidades de ondas de materia, la potencia de los métodos desarrollados en cavidades ópticas resonantes.
El espejo de átomos utiliza la fuerza ejercida por una onda luminosa sobre un átomo. Está formado por una delgada capa de luz que se propaga por la superficie de un prisma de vidrio. Esta capa de luz es una onda evanescente obtenida por reflexión total de un haz láser en la cara interna del prisma. La energía potencial dipolar, resultante del acoplamiento entre el átomo y la onda evanescente, tiende a rechazar al átomo fuera de la luz. Si los átomos no se sueltan demasiado arriba, dan media vuelta en la capa luminosa sin llegar a tocar el prisma (fig. 7). En primer lugar, se fabricó un trampolín atómico en Stanford,[24] y luego en el NIST-NBS de Washington. En estos dos experimentos, las pérdidas eran tales que todos los átomos habían huido de la cavidad después de dos rebotes. Muy recientemente, este experimento ha sido notablemente mejorado en la Escuela normal superior, en Francia, por C. Aminoff, P. Bouyer, P. Desbiolles y A. Steane: habiendo logrado un espejo con un 70 % de reflectividad, han podido observar átomos de cesio que realizan una decena de rebotes antes de escapar.
Por tanto, este tipo de experimento es un primer paso hacia una cavidad resonante de ondas de De Broglie. La realización de espejos de átomos eficaces puede desembocar en importantes aplicaciones, basadas en la posibilidad de obtener una focalización muy precisa de haces de átomos. De este modo se podrían desarrollar nuevas microsondas y procedimientos de microlitografía a muy pequeña escala.

que realizan la transición deseada, y finalmente, contando electrónicamente los periodos de esta onda, se puede construir un reloj que proporcione un «top» cada segundo.

En igualdad de condiciones, un reloj atómico es tanto más preciso cuanto de más tiempo se dispone para hacer que el átomo interaccione con la onda electromagnética. De este modo se ha pasado de una situación en la que la zona de interacción, que medía algunos centímetros, era atravesada por los átomos en 0,1 milisegundos, a una geometría con dos zonas, inventada en 1949 por el físico norteamericano N. Ramsey. Con esta técnica, que le valió el premio Nobel en 1989, Ramsey demostró que la duración de la interacción que se tiene que tener en cuenta es el tiempo de recorrido entre las dos zonas, que puede alcanzar varias decenas de milisegundos para una separación de algunos metros. Los rendimientos de estos relojes son notable. Con una precisión relativa inferior a 10^{-13}, estos relojes se habrían desviado en menos de una décima de segundo desde el hombre de Neanderthal. Sin embargo, existe una importante necesidad de relojes aún más precisos.

Gracias a la realización de fuentes atómicas, los átomos enfriados por láser ofrecen una respuesta sencilla a esta necesidad (véase «Una fuente atómica», *Mundo Científico*, nº 101, abril, 1990). Una nube de átomos de cesio fríos, lanzada hacia arriba por un láser anexo, interacciona una primera vez con la onda electromagnética, da media vuelta por efecto de la gravedad, y luego interacciona una segunda vez con la onda (fig. 5). El tiempo total de interacción a tener en cuenta, para una fuente de una altura de un metro, es del orden del segundo, ¡cien veces mayor que en los relojes tradicionales! Numerosos laboratorios de metrología, en Francia el laboratorio primario de tiempos y frecuencias del Observatorio de París y el laboratorio del reloj atómico de Orsay, trabajan ahora en la realización práctica de un verdadero reloj de este tipo,[22] que saque plenamente partido de la ganancia aportada por el enfriamiento láser, y que podría alcanzar una precisión de 10^{-16}.

Una última limitación de estos relojes de átomos fríos es la gravedad: si se mantienen alturas razonables de la fuente, del orden del metro, los tiempos de interacción no pueden superar el segundo. En gravedad cero por el contrario, no hay límite para este tiempo. Por tanto, enfriar los átomos en microgravedad se convierte en un objetivo importante. En una serie de vuelos parabólicos, B. Lounis, J. Reichel y C. Salomon pudieron enfriar átomos por láser, y demostraron que entonces estos átomos se pueden observar durante mucho más tiempo que en la Tierra.[23] Estos experimentos son los primeros pasos hacia un reloj de átomos fríos en satélite, potencialmente más preciso que un reloj terrestre.

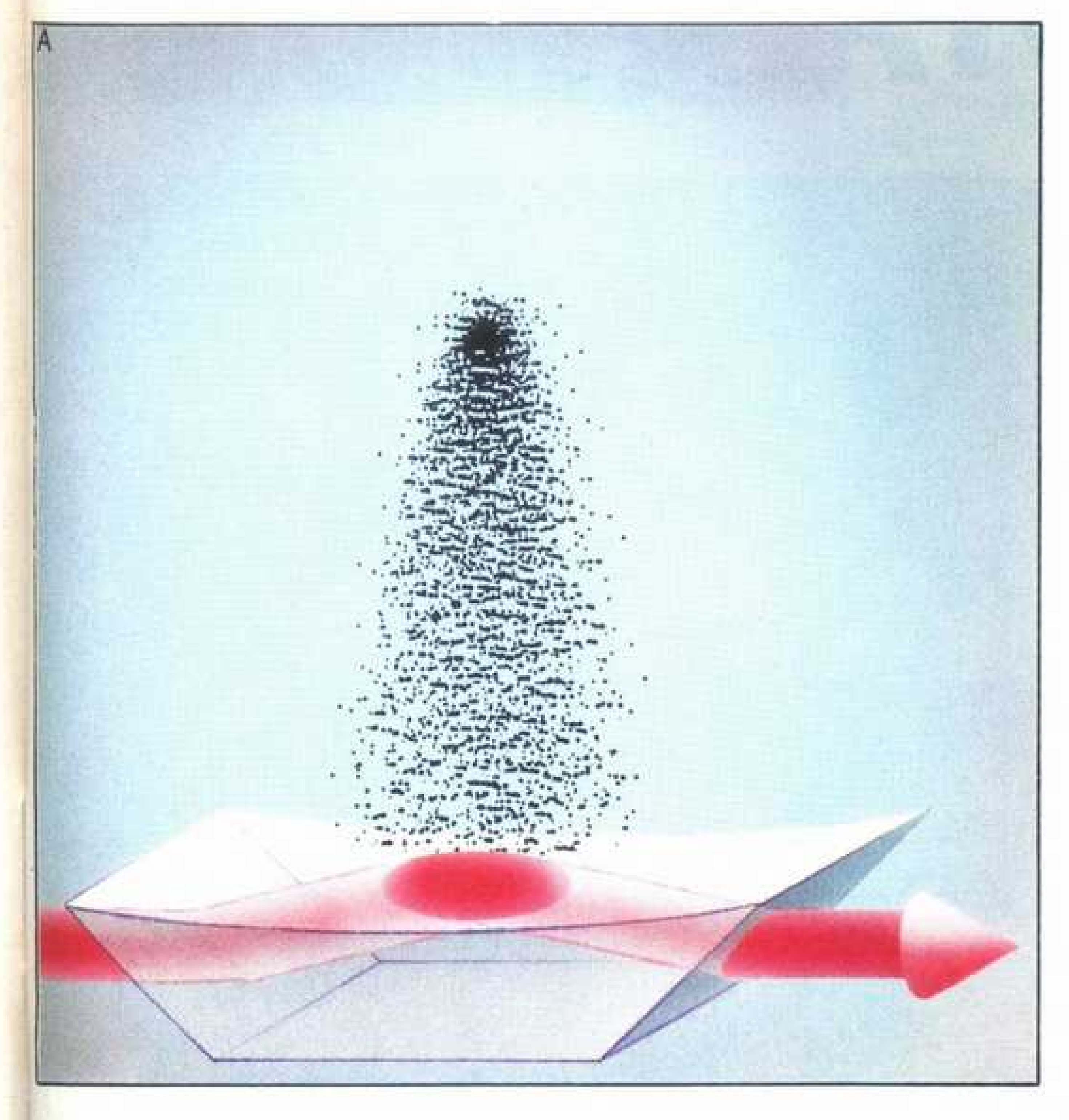


Figura 7. Los átomos fríos, soltados encima de un prisma «recubierto» con una delgada capa de luz (producida por una onda evanescente) rebotan sin pegarse al vidrio, ya que dan media vuelta en la capa luminosa (A). Con este «trampolín» de átomos, los investigadores han observado hasta una decena de rebotes sucesivos. La etapa siguiente consiste en obtener interferencias entre estos rebotes: de este modo se habrá realizado una cavidad de ondas atómicas análoga a las cavidades Fabry-Pérot de la óptica. Entonces se podrá intentar preparar los átomos en un modo estacionario de la onda de De Broglie, modo que presenta una sucesión de mínimos y máximos de la densidad de probabilidad de presencia. Esta configuración, calculada en 1992 por H. Wallis, J. Dalibard y C. Cohen-Tannoudji,[26] está representada en B.

Los diferentes ejemplos que hemos abordado ilustran la variedad de los temas relacionados con la manipulación de átomos por láser (véase también el recuadro 2). El láser desempeña aquí el doble papel de un refrigerador y de una micropinza, unas utilizaciones que se encuentran en otras ramas de la física y de la biología. Se sabe, por ejemplo enfriar y observar iones aislados en trampas electromagnéticas. También se utiliza corriente mente el método inventado por Ashkin al principio de los años ochenta, consistente en capturar bacterias en el foco de un haz láser y en manipularlas bajo el objetivo de un microscopio sin destruirlas. Finalmente, la micropinza láser podría aportar una solución a un problema fundamental en la investigación de la antimateria. Desde hace tiempo se sabe producir antiprotones y antielectrones (o positrones), es decir, los constituyentes básicos de un átomo de antihidrógeno. Se espera fabricar dentro de poco estos átomos en pequeñas cantidades, pero, para estudiarlos, se plantea el problema de conservarlos. Unas paredes materiales provocarán inevitablemente la aniquilación de esta antimateria al primer contacto, mientras que los haces láser, asociados a campos magnéticos, constituirán un recinto inmaterial, en el que se podrá acumular el antihidrógeno con total seguridad. El enfriamiento y la captura por láser, materias fértiles en descubrimientos durante los últimos diez años, tendrían que estar en el origen de nuevos desarrollos, igualmente apasionantes, tanto en el aspecto fundamental, ya que con el acceso a temperaturas ultrabajas se podría producir una condensación de un tipo específicamente cuántico, la condensación de Bose, como en el aspecto aplicado, con la realización en el espacio de relojes atómicos de una precisión jamás alcanzada. ■

PARA MÁS INFORMACIÓN:

- J. Dalibard *et al.*, (eds.), *Systèmes fondamentaux en optique quantique*, Escuela de verano 1990, Les Houches, North-Holland, 1992.
- E. Arimondo *et al.*, (eds.), *Laser manipulation of atoms and ions*, sesión CXVIII de la Escuela Enrico Fermi 1991, North Holland, 1992.

- Para una bibliografía más completa véase la página 293.

LOS ARCHIVOS GLACIALES DE GROENLANDIA



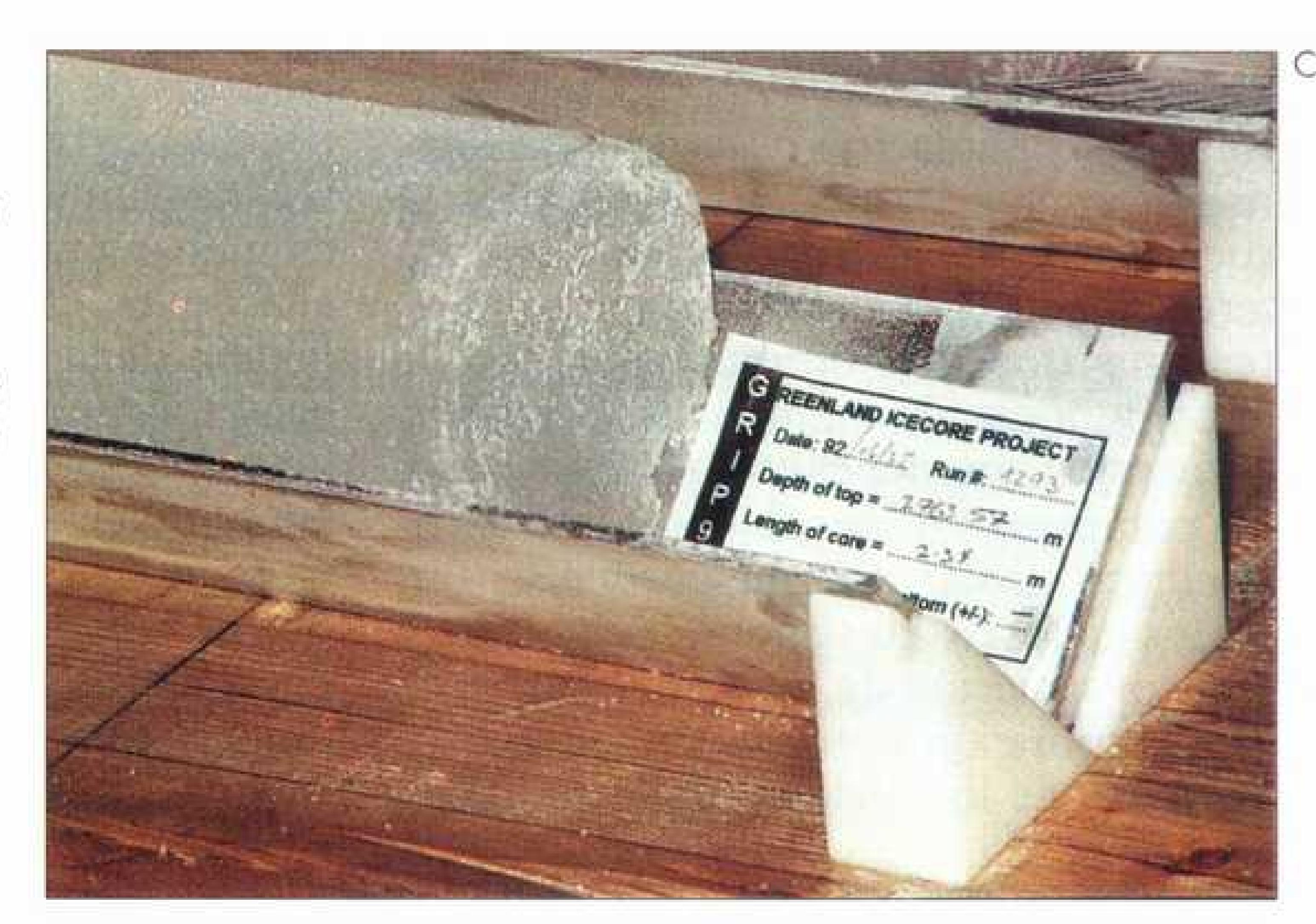
A JEAN JOUZEL, CLAUDE LORIUS Y MICHEL STIEVENARD

LOS HIELOS POLARES, LOS SEDIMENTOS MARINOS Y LOS SEDIMENTOS CONTINENTALES NOS HAN REVELADO MUCHAS COSAS ACERCA DE LOS CLIMAS DEL PASADO: RITMO DE LAS GRANDES GLACIACIONES DE LA ERA CUATERNARIA, PAPEL DE LOS CAMBIOS DE INSOLACIÓN, RELACIÓN ENTRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y CLIMA, RÁPIDAS VARIACIONES DE TEMPERATURA DURANTE LAS ERAS GLACIALES. HASTA AHORA, LOS CLIMATÓLOGOS ESTABAN CONVENCIDOS DE LA ESTABILIDAD DEL CLIMA EN LOS PERIODOS INTERGLACIALES, COMO EL QUE AHORA VIVIMOS. PERO LOS HIELOS DE GROENLANDIA PERMITEN AFIRMAR QUE HACE 100 000 AÑOS EL ÚLTIMO PERIODO CÁLIDO FUE INTERRUMPIDO POR BRUSCOS REGRESOS HACIA UN CLIMA GLACIAL. LA EXISTENCIA DE VARIACIONES DE TEMPERATURA DE 10° EN POCOS DECENIOS NOS INCITAN A MIRAR CON NUEVOS OJOS EL FUTURO DE NUESTRO CLIMA.



B

Figura 1. Dos sondeos profundos acaban de ser realizados en el centro de Groenlandia, el sondeo europeo GRIP (Greenland Ice Core Project) (A) y el sondeo norteamericano GISP II (Greenland Ice Sheet Program). Sus objetivos son similares y ambiciosos; reconstruir la evolución del clima y del medio ambiente durante más de 200 000 años mediante el análisis isotópico de las muestras extraídas en el hielo (B y C). (Fotos A, Ivar Silis; B y C, Robert Delmas-LGGE.)



C

12 de julio de 1992. El sondeo GRIP (*Greenland Ice Core Project*) alcanza el zócalo rocoso a más de 3 kilómetros de profundidad. La extracción de la última muestra corona cuatro años de esfuerzos en el emplazamiento de Summit, en pleno centro de Groenlandia (fig. 1A). Será un día de fiesta para todos los científicos de los ocho países europeos asociados al proyecto. Clima, acción del hombre sobre su medio, volcanismo, materia cosmogénica... estos 3 000 metros de muestreo han registrado todo lo ocurrido desde hace 250 000 años. Un año después del éxito del sondeo, la cosecha de resultados es abundante y llena de sorpresas.

El registro revela la existencia de sucesos rápidos, incluso catastróficos, durante el último periodo interglacial, llamado eemiense, entre - 135 000 y - 115 000 años. Nadie esperaba que este periodo, ligeramente más cálido que el actual, difiriera totalmente de él. Y, no obstante, el periodo en cuestión fue interrumpido varias veces por episodios climáticos bastante parecidos a un periodo glacial.

La paleoclimatología (estudio de los climas del pasado) se basa en distintos métodos para reconstruir nuestro pasado climático. En las regiones continentales: geomorfología, crecimientos de los anillos de los árboles, lagos y sedimentos lacustres, aguas subterráneas, paleosuelos, estalagmitas, pólenes, fósiles de insectos y de caracoles; en el océano, corales y sedimentos marinos; en Groenlandia y en la Antártida, sondeos profundos (fig. 2). Estos métodos son complementarios; cada uno de ellos tiene sus ventajas, sus límites y sus especificidades. Así, el estudio de los pólenes informa sobre las temperaturas y las precipitaciones en las regiones continentales. El de los sedimentos marinos indica las variaciones

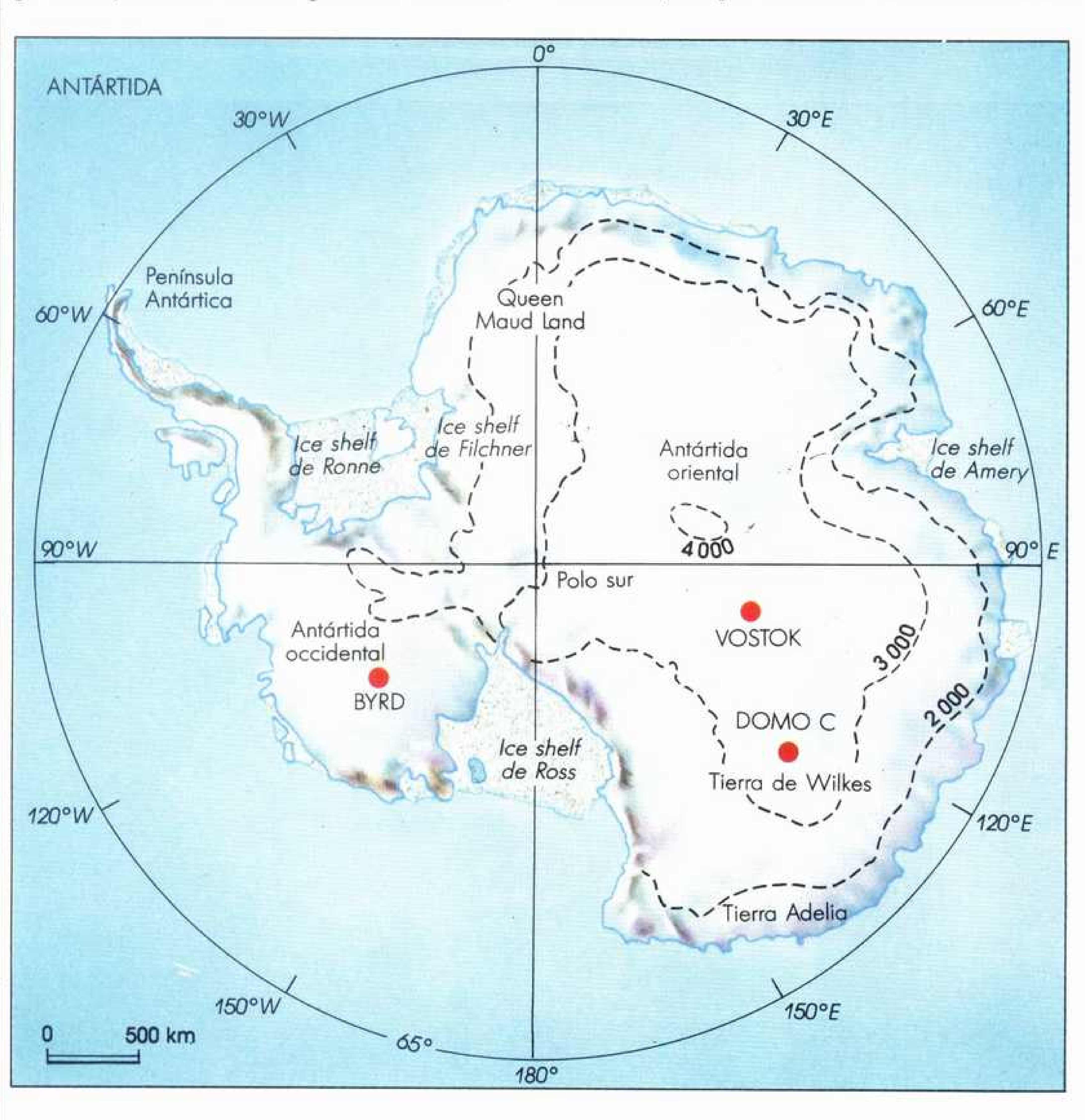
JEAN JOUZEL es ingeniero en el Commissariat à lénergie atomique. Trabaja en el laboratorio de modelización del clima y del medioambiente en Saclay (LMCE) y también en el LGGE. Es adjunto a los directores en cada uno de estos laboratorios.
CLAUDE LORIUS es director de investigación en el CNRS. Trabaja en el laboratorio de glaciología y geofísica del medioamiente (LGGE de Grenoble), del cual ha sido director. Actualmente es presidente del Instituto francés para la investigación y la tecnología polares.
MICHEL STIEVENARD es ingeniero en el Commissariat à l'énergie atomique. Trabaja en el LMCE (CEA Saclay).

del nivel del mar así como las temperaturas y la circulación oceánicas; su análisis isotópico ha permitido estudiar la sucesión de los periodos glaciales e interglaciales que han jalonado la era cuaternaria (los dos últimos millones de años) y poner de manifiesto la relación entre estos grandes cambios climáticos y los parámetros de la órbita terrestre (véase el recuadro 1) ¿En qué pueden ser útiles los hielos de las regiones polares para la reconstrucción de los climas pasados?

La composición isotópica (deuterio, oxígeno 18) de los hielos polares se caracteriza por el hecho de guardar el recuerdo de las variaciones climáticas (véase el recuadro 2). Se observa, en efecto, una relación lineal entre la temperatura media anual de un lugar y las concentraciones de ambos isótopos. Además, el análisis de las burbujas atrapadas durante la transformación de la nieve en hielo permite reconstruir la atmósfera del pasado y especialmente las variaciones de los gases de efecto invernadero (dióxido de carbono y metano). Por otra parte, estos hielos constituyen un material extremadamente puro que se presta bien al análisis de trazas, compuestos químicos y aerosoles de origen diverso (marino, continental, biogénico, volcánico o extraterrestre, actividad humana...). Añadamos que los casquetes polares ofrecen registros de muy alta resolución (anual e incluso estacional). Hay, sin embargo, algunas limitaciones: dificultad de datación absoluta de las capas de hielo más allá de los últimos 10 000 años, disminución de la resolución en profundidad ligada al progresivo adelgazamiento de las capas anuales a medida que se va penetrando en los casquetes, y, por último, unos archivos más restringidos que los que ofrecen los sedimentos marinos: los registros actualmente disponibles no van mucho más allá de los 250 000 años.

Además, la perforación del hielo hasta profundidades de varios kilómetros es una operación de gran tecnicidad que hay que realizar en lugares particularmente inhóspitos y de difícil acceso. La penetración, la extracción de la muestra y de los desechos o del agua de fusión, la utilización de un fluido para evitar el cierre del agujero por obra del hielo, son otras tantas dificultades que sólo unos pocos equipos en todo el mundo han logrado vencer. No es de extrañar, entonces, que pese al enorme potencial de los archivos glaciales de cara a la evolución del clima global, los grandes sondeos se contasen, antes del éxito del GRIP, con los dedos de una mano, incluyendo Groenlandia y la Antártida. Y ello pese a treinta años de continuo esfuerzo internacional...

Debemos el primer sondeo en el hielo a los norteamericanos del CRREL (Cold Regions Research Engineering Laboratory), que, en 1966, llegaron al zócalo rocoso en el noroeste de Groenlandia, en Camp Century, una base militar con carreteras, casas, un cine y una iglesia. Como resultado, 1 390 metros explorados y un hielo de 100 000 mil años de antigüedad estudiado conjuntamente con el equipo de Willy Dansgaard, de Copenhague. El CRREL se desplazó entonces a la Antártida occidental, en la estación Byrd. Allí también se alcanzó el zócalo rocoso, en 1968. La obtención de una muestra de más de dos kilómetros constituyó un importante éxito pese a que el hielo no rebasaba los 80 000 años de antigüedad. Por desgracia, el instrumento de perforación se quedó en el fondo del pozo. Hubo que esperar a



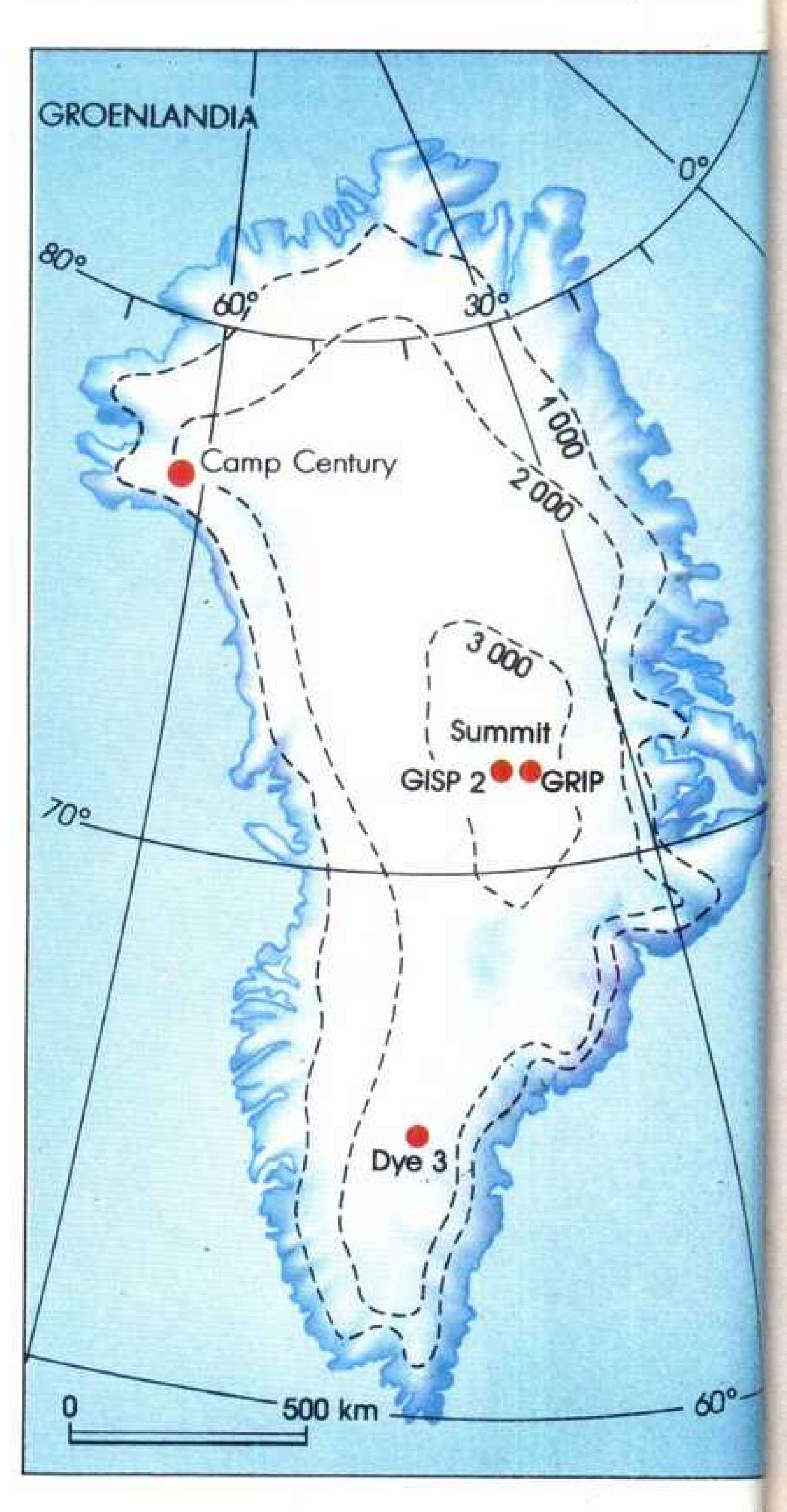


Figura 2. Los archivos glaciales constituyen un enorme potencial para el estudio de la evolución del clima global, pero perforar el hielo hasta profundidades de varios kilómetros es una operación de alta tecnicidad. Pese a casi treinta años de esfuerzo internacional sostenido, sólo unos pocos equipos en todo el mundo han logrado vencer las dificultades asociadas. Estos mapas indican los puntos de sondeo profundo en la Antártida y en Groenlandia: Camp Century, Dye 3, GRIP, GISP II (Groenlandia), Byrd, Vostok, Domo C (Antártida).

1993 para que los norteamericanos volvieran a celebrar el éxito de un sondeo profundo.

A principios de los años 1970 se inició la gran aventura del sondeo Vostok, en la Antártida oriental. Esta estación soviética, situada a una altitud de 3 488 metros, detenta el récord de temperatura terrestre más baja (-89,7 °C) La temperatura media anual es de -55,5 °C. Debido al intenso frío, el régimen de precipitaciones es casi desértico. Cae el equivalente de 2 centímetros de agua anuales. Gracias a este bajo nivel de precipitaciones y al gran espesor del casquete (3 700), Vostok es un lugar ideal para remontarse lejos en el tiempo. Pese a las condiciones hostiles y a la dificultad del acceso, los soviéticos instalaron allí una estación permanente y realizaron unos sondeos cada vez más profundos, 500 metros en 1970 y 950 en 1974. Pero no tardaron en dejar de ser los únicos en realizar sondeos en la Antártida oriental.

EN LOS AÑOS 1970, LA REALIZACIÓN DE UN SONDEO PROFUNDO SE CONVIRTIÓ EN UNA PRIORIDAD PARA LOS INVESTIGADORES EUROPEOS

■

En efecto, tras una serie de estudios dedicados a las nieves superficiales de Groenlandia (en los años 1960) y de la Antártida, la realización de un sondeo profundo en la Antártida oriental pasó a ser una prioridad del laboratorio de glaciología del CNRS de Grenoble. Al proyecto se unieron los isotopistas del CEA (Commssariat à l'énergie atomique, laboratorio de geoquímica isotópica de Saclay), especialistas en análisis del deuterio y del oxígeno 18 contenidos en el agua y antiguos compañeros de los glaciólogos. A principios de 1978, en menos de dos meses, se extraía del Domo C una muestra de 904 metros que abarcaba los 40 000 últimos años. Aunque el periodo era relativamente restringido, permitió obtener importantísimos resultados. Robert Delmas, Jean-Marc Ascensio y Michel Legrand, de Grenoble, descubrieron que la concentración de gas carbónico había aumentado un 50 % entre el último máximo glacial, hace 20 000 años, y el periodo preindustrial.(1) Además, y sobre todo, los franceses entraban por la puerta grande en el círculo restringido de las naciones que habían realizado sondeos profundos en las regiones polares. Gracias en gran medida a la experiencia adquirida durante el proyecto del Domo C, los equipos franceses fueron asociados al esfuerzo soviético. En 1982, a los investigadores de Grenoble y Saclay se unieron Grant Raisbeck y Françoise Yiou, del centro de espectroscopía nuclear y espectrometría de masas del CNRS de Orsay, cuyas medidas del berilio 10 permitieron, entre otras cosas, evaluar la velocidad de acumulación de la nieve (que decrece durante los periodos glaciales). El proyecto gozó del soporte logístico de los norteamericanos, que aseguraron los transportes desde el polo Sur. El tercer sondeo soviético en Vostok superó los 2 000 metros de profundidad en 1983. Por primera vez, una muestra de hielo permitía reconstruir la historia del clima y del medio ambiente a lo largo de un ciclo climático completo (150 000 años); en especial, ofrecía una serie de resultados notables sobre la relación entre el clima y los gases de efecto invernadero.(2)

¿Y el gran Norte? en 1970, los daneses, respaldados por el islandés Sigfus Johnsen, habían optado por construir su propia máquina de extracción, llamada ISTUK. Entre 1979 y 1981, se efectuó el segundo sondeo de Groenlandia en la estación Dye 3, en el sur de Groenlandia, en colaboración con los norteamericanos y los suizos. Fue una perforación de más de dos kilómetros, que permitió estudiar un periodo de unos 100 000 años y descubrir la existencia de variaciones climáticas muy rápidas (de decenas de años) en el periodo glacial y a fines de la última glaciación. Pero Dye 3 distaba de ser un lugar ideal porque estaba situado en una región costera muy accidentada; además, el emplazamiento, relativamente cálido, no permitía explotar la composición de las burbujas de aire.

En Groenlandia, la definición del emplazamiento ideal es fácil: es el punto alto de la meseta de Groenlandia situado en su parte central (72 °34'N, 37 °37'W) a una altitud de 3 240 metros. Se trata de un domo muy aplanado que, no obstante, los glaciólogos han bautizado con el nombre de Summit. Este domo es el único lugar de Groenlandia donde la nieve no sufre movimientos horizontales al hundirse en el casquete. Por tanto, la secuencia de las informaciones no queda perturbada. Como el espesor de hielo es allí máximo, de algo más de 3 kilómetros, cabe esperar obtener en dicho lugar el hielo más antiguo. Por último, es un lugar frío, con una temperatura media anual de -32 °C, favorable a los análisis de trazas gaseosas. Todo ello era conocido cuando se eligió el Dye 3. Pero en aquel momento el viaje al centro de Groenlandia era una operación difícil de realizar que requería una inversión financiera excesiva.

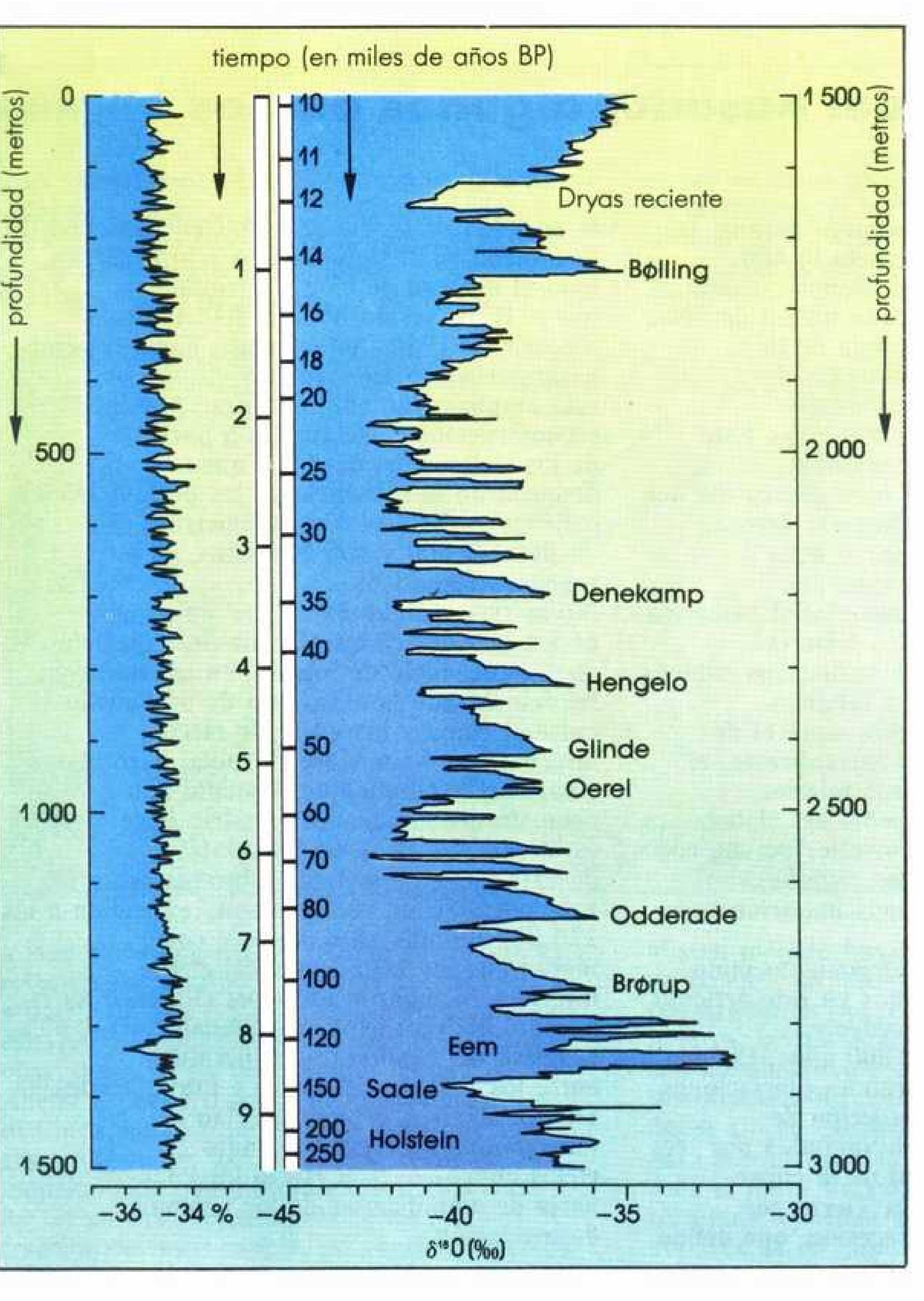


Figura 3. En julio de 1992, el sondeo GRIP alcanzó los 3 000 metros de profundidad. Las curvas isotópicas del deuterio y del oxígeno 18 permiten remontarse hasta hace unos 250 000 años. Esta curva representa las concentraciones de oxígeno 18: a la izquierda, las variaciones en los primeros 1 500 metros; a la derecha, las variaciones entre 1 500 y 3 000 metros. Las escalas de profundidad (lineales) están representadas en los ejes de la izquierda y de la derecha, respectivamente. La parte de la izquierda abarca los 10 000 últimos años y la de la derecha el periodo comprendido entre -10 000 y -250 000 años (ejes centrales). Se observa enseguida el contraste entre la estabilidad de la concentración de oxígeno 18 desde hace 10 000 años y el perfil muy agitado de los últimos 1 500 metros de sondeo, especialmente durante el último periodo cálido.

(1) R.J. Delmas, J.M. Ascensio, M.Legrand, *Nature, 284*, 155, 1980.
(2) Serie de tres artículos, en *Nature* del 1 de octubre de 1987, vol., 329, J. Jouzel *et al.*, p. 403, J.-M. Barnola *et al.*, p. 408, Genthon *et al.*, p. 414. También J. Chapellaz *et al.*, *Nature, 345*, 127, 1990; C. Lorius *et al.*, *347*, 139, 1990 y D. Raynaud *et al.*, *Science, 259*, 926, 1993.

Después de Dye 3, en 1982, el glaciólogo danés Willy Dansgaard volvió a coger su bastón de peregrino y abogó ante la NSF (National Science Foundation de Estados Unidos) en favor del proyecto de sondeo en Summit que tanto deseaba hacer. Pese al activo apoyo de los científicos norteamericanos y del equipo suizo de Hans Oeschger, de la universidad de Berna, la idea, en un primer momento, tuvo dificultades de concreción. Daneses y suizos se volvieron entonces hacia Europa y especialmente hacia Francia. Tomaba cuerpo la idea de una colaboración a tres (Dinamarca, Francia y Suiza), dedicada al estudio de los últimos 1 000 años, es decir, de los 300 primeros metros del casquete de la estación Summit. Estos tres países recibieron un apoyo muy importante de la CEE y la idea dio lugar al proyecto EUROCORE, realizado en 1989.

La Fundación europea de la ciencia fue seducida por el objetivo de un sondeo profundo y se comprometió a ponerlo en marcha, con la condición de que la financiación corriera a cargo de los organismos nacionales; en Francia, por ejemplo, la operación GRIP fue financiada por el Instituto nacional de ciencias del Universo (INSU/CNRS), el ministerio de Investigación y Educación, el Comisariado de energía atómica, el Intituto francés para la investigación y la tecnología polares y la Fundación de Francia. Otros cinco países (Alemania, Inglaterra, Bélgica, Islandia e Italia) se unieron al proyecto, aportándole sus competencias científicas, y, con las Comunidades europeas, ayudaron a completar el presupuesto.

Mientras tanto, los científicos norteamericanos no habían permanecido inactivos y habían convencido a la NSF de la oportunidad de un sondeo profundo en el centro de Groenlandia. En una reunión entre norteamericanos y europeos, se hizo la propuesta de realizar dos sondeos complementarios en la región de Summit: GRIP (*Greenland Ice Core Project*), por parte europea, y GISP II (*Greenland Ice Sheet Program*), por parte norteamericana, con una distancia entre ambos de 30 kilómetros. Los objetivos eran similares y ambiciosos: reconstruir la evolución del clima y del medio ambiente a lo largo de 200 000 años. La idea, por supuesto, consistía en comprender mejor nuestro pasado, pero también en aportar informaciones útiles para predecir mejor el clima y el medio ambiente de los próximos decenios. GRIP se inició en junio de 1990 con la máquina de perforación danesa. Junto a los daneses, se encargaron de los sondeos distintos equipos de Grenoble, Berna, Rejkavik, Bremerhaven y Cambridge. Se perforó permanentemente y se adoptó el sistema de los tres ochos. Se extrajeron unas diez muestras diarias de más de 2 metros, de excelente calidad. El sondeo se efectuó, tal como estaba previsto, en tres veranos: 710 metros en 1990, 2 320 metros en 1991 y 3 028,8 metros el 12 de julio de 1992.

Nuestros colegas norteamericanos tuvieron menos suerte. Su nuevo perforador, realizado en Alaska, tenía un tamaño impresionante y permitía extraer muestras de seis metros y de mayor diámetro (12 centímetros contra 10 cm con ISTUK). Aunque el aparato dio total satisfacción, el cable encargado de subir y bajar el perforador tuvo problemas. La temporada 1992 debió interrumpirse a una profundidad de 2 200 metros. Un nuevo cable llegó a Summit en mayo de 1993 y los norteamericanos tocaron el fondo a principios de julio. Batieron el récord de profundidad de los europeos (3 054 metros) y, gracias unos instrumentos especiales, lograron extraer 150 centímetros de roca del zócalo groenlandés.

¿De qué resultados se dispone ya? Volvamos atrás, hasta agosto de 1991. El sondeo GRIP alcanza los 2 321 metros. Los europeos saben que están ante el hielo del último periodo glacial, de más de 20 000 años de edad. Los análisis isotópicos realizados en Copenhague, Rejkavik y Saclay van a buen ritmo. Se da prioridad a la parte inferior de la muestra, con el objetivo de confirmar la existencia de variaciones climáticas rápidas a fines del último periodo glacial y de la transición abrupta hacia las condiciones climáticas actuales, ambas puestas de manifiesto en la muestra de Dye 3. Pero antes de desvelar los resultados, hablemos un poco del modo de datación del sondeo GRIP...

La nieve tiene un contenido isotópico en deuterio y oxígeno 18 mayor en verano que en invierno (consecuencia directa, como ya hemos visto, de la relación con la temperatura; véase el recuadro 2). Este ciclo estacional permite datar las capas sucesivas año por año. El método fue aplicado al sondeo de Dye 3 en una extensión de unos 10 000 años. Más allá, la señal estacional se atenúa y acaba desapareciendo por efecto de la difusión del agua en forma de vapor en el nevero (parte superior del casquete en la que la nieve se compacta y se va transformando en hielo) y luego en el hielo. Para decepción nuestra, esta desaparición es más rápida en Summit. Las variaciones isotópicas estacionales son inútiles para datar el hielo más allá de los 3 000 años. Las grandes erupciones volcánicas, que dejan una huella química fácilmente detectable en el hielo, no son muy útiles porque su cronología es cada vez más incierta a medida que nos remontamos en

Los climas del pasado, algunos puntos de referencia

1

El clima terrestre ha ido variando durante la larga historia de nuestro planeta (4 600 millones de años) con una tendencia general al enfriamiento. Durante el último millón de años, el clima ha sido en gran medida de tipo glacial, con intervalos interglaciales relativamente breves que reaparecen aproximadamente cada 100 000 años. Este ciclo es característico de la segunda mitad de la era cuaternaria (que abarca los dos últimos millones de años). Nuestro periodo interglacial, el holoceno, empezó hace 10 000 años. Hace 20 000 años nos encontrábamos en un máximo glacial. América del Norte, Europa del norte y Siberia almacenaban 50 millones de kilómetros cúbicos de hielo, el doble, o casi, del volumen actual de la Antártida y veinte veces el de Groenlandia. Como consecuencia directa, el mar tenía un nivel 120 metros inferior al actual. La temperatura media del planeta era unos 4 o 5 °C menor que su valor actual, con diferencias más débiles en las regiones ecuatoriales y tropicales y más importantes en los casquetes polares.

En Europa occidental, el enfriamiento pudo alcanzar los 10 °C. Hablamos en este artículo del periodo interglacial precedente, el eemiense, hace unos 120 000 años. La idea de una relación entre las grandes glaciaciones de la era cuaternaria y la posición de la Tierra con respecto al Sol (definida por tres parámetros, la excentricidad de la elipse terrestre, la inclinación de la Tierra con respecto a su órbita y la precesión, que define la posición de la Tierra en los equinoccios) fue formulada en el siglo pasado y formalizada, bajo el nombre de teoría astronómica, por el físico serbio Milutin Milankovich a partir de 1930. Actualmente, dicha relación parámetros orbitales/clima está ampliamente admitida gracias a las reconstrucciones efectuadas a partir de los sedimentos marinos, que demuestran la presencia de las periodicidades características de estos parámetros, 20 000, 40 000 y 100 000 años, en los registros climáticos.

No se trata, sin embargo, del único actor de los grandes ciclos glaciales/interglaciales. El análisis del hielo de Vostok, en la Antártida, ha demostrado la existencia de un vínculo entre el clima y los gases de efecto invernadero. Jean-Marc Barnola, Jerôme Chapellaz y Dominique Raynaud han demostrado que cuanto más frío hace menor es la concentración de dióxido de carbono y de metano, e inversamente.[20] Esta correlación, recientemente extendida a los 220 000 últimos años, sugiere con fuerza que las variaciones del efecto invernadero jugaron un papel climático en el pasado; podrían explicar razonablemente bien la mitad del cambio de temperatura entre los periodos glaciales e interglaciales.[2] Los parámetros orbitales serían el «metrónomo» de estos grandes ciclos climáticos y el efecto invernadero haría de amplificador de los cambios de insolación.

el tiempo. Afortunadamente, los químicos toman el relevo. El contenido en polvo y elementos químicos tales como calcio, nitrato y amonio tienen a su vez un ritmo estacional bien marcado. Es un trabajo de benedictino pero los resultados están ahí, pese a que la precisión disminuye con la profundidad. La edad del sondeo está determinada con una precisión de 60 años para 10 000 años (1 515 m), de 800 para 20 000 (1 884 m). A 2 321 metros, el hielo tiene 40 000 años (± 2 000 años).

La variación del contenido en oxígeno

tuaban este suceso entre -11 000 y - 10 000 años, pero los métodos basados en el estudio de los sedimentos lacustres o de los anillos de los árboles parecían indicar una edad mayor. El problema acaba de ser resuelto gracias a los trabajos realizados por Edouard Bar y Bruno Hamelin (actualmente en la universidad de Marsella) durante su estancia en Lamont, cerca de Nueva York. Estos franceses, y sus colegas norteamericanos, demuestran que el Dryas reciente terminó hace 11 500 años. Lo confirman los glaciólogos europeos y norteamericanos: otros factores por la circulación atmosférica (el transporte de polvo a Groenlandia es tanto mayor cuanto más fuertes son los vientos) pase de unos valores elevados, de tipo glacial, a otros mucho menores característicos del clima actual.(4) La acumulación se duplicó casi instantáneamente, en tres años o tal vez incluso de un año al otro.(5)

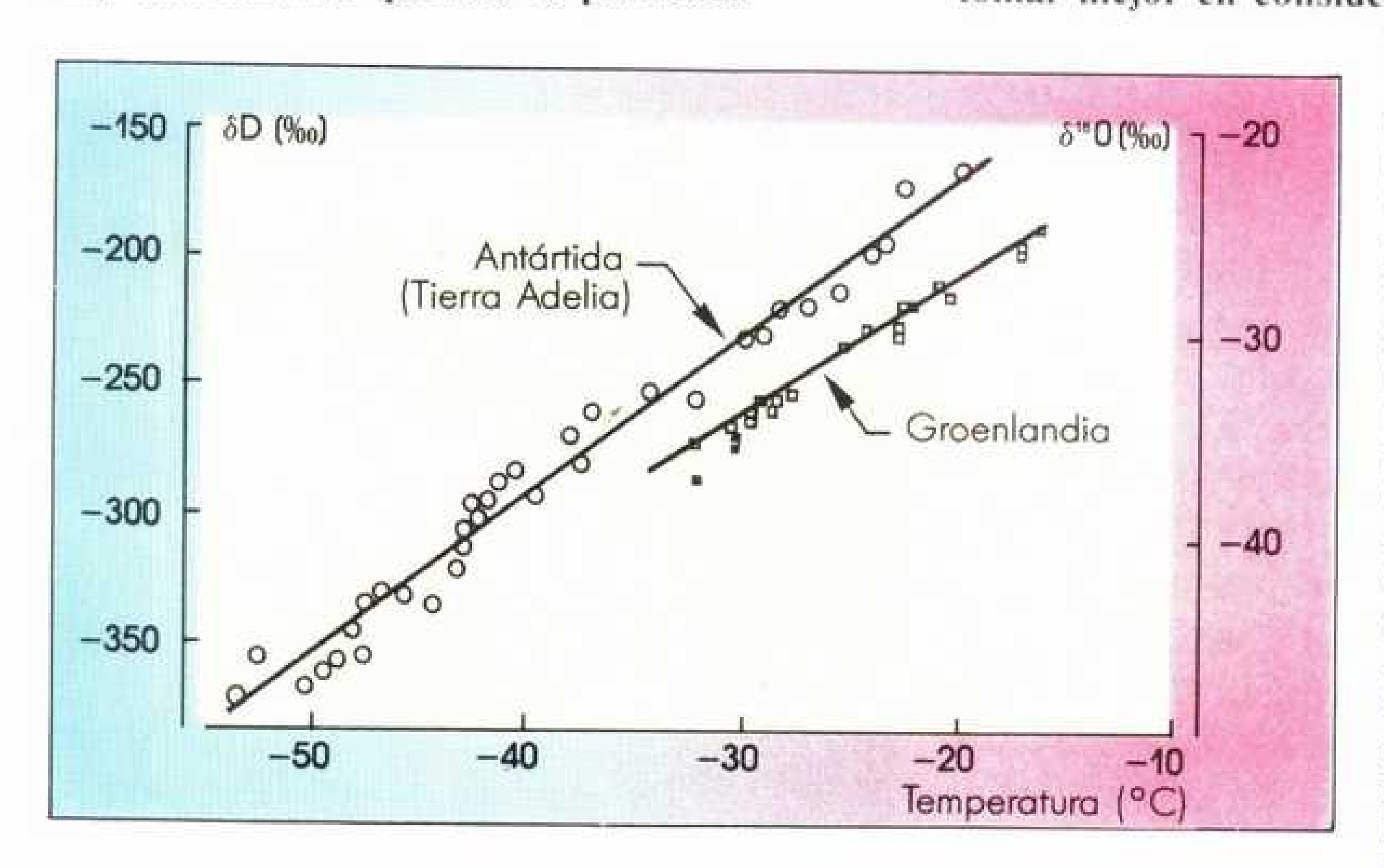
En realidad, la noción de cambio rápido estaba ya estrechamente asociada a los hielos de Groenlandia desde el sondeo de Dye 3 y el descubrimiento de una serie de fluctuaciones del periodo glacial,

El «termómetro isotópico» 2

El hidrógeno (^1H) y el oxígeno (^{16}O) tienen cada uno dos isótopos presentes en el ciclo del agua, ^2H y ^3H (deuterio, D y tritio, T), ^{17}O y ^{18}O. Entre las formas isotópicas de la molécula de agua, sólo las HDO y $H_2{}^{18}O$, las más abundantes, tienen interés en el contexto de los estudios climáticos. Las presiones de vapor saturante de estas moléculas son ligeramente inferiores a la del $H_2{}^{16}O$. En cada cambio de fase del agua, la fase condensada (lluvia o nieve) es más rica en isótopos pesados que la fase de vapor que le da origen. Hay pues un empobrecimiento progresivo de la concentración isotópica del vapor y de las precipitaciones a medida que la masa de aire se va enfriando. El resultado se ilustra en la figura adjunta para la Antártida y Groenlandia, donde se observa una relación lineal entre la temperatura media anual del lugar y la concentración isotópica, tanto del deuterio como del oxígeno 18. Estas concentraciones se expresan en diferencias (δ en ‰) con respecto a un estándar de referencia de composición próximo al del océano mundial (los cocientes isotópicos de ese estándar son D/H = 155,76.10^{-6} y $^{18}O/^{16}O$ = 2005,2.10^{-6}). Dicha linealidad se explica bien a partir de un modelo isotópico, llamado de Rayleigh, al que se traduce la descripción simplificada de la vida de una masa de aire; está en la base del denominado «termómetro isotópico»: cuanto más frío hace menor es la concentración isotópica e inversamente. Así, una reducción del 1 ‰ de la concentración de oxígeno 18 corresponde a un enfriamiento del 1,5 °C. Aplicada a un determinado lugar, esta correspondencia permite reconstruir las variaciones del clima a partir de un registro isotópico.

Hay una cuestión que nos es planteada a menudo y con razón. ¿Cómo saber que esta relación definida para el clima actual, a partir de una relación determinada a escala espacial, se aplica a variaciones temporales observadas en un determinado lugar? Además, puede tratarse de climas muy distintos, como uno glacial y otro interglacial. Para responder, los isotopistas recurren a modelos más complicados. Los ciclos de las moléculas isotópicas (y los fraccionamientos asociados) son introducidos en los modelos de circulación general de la atmósfera, los mismos que sirven para simular la evolución del clima.

La ventaja es doble: se puede tomar mejor en consideración la complejidad de los procesos atmosféricos, cosa que no es posible con un modelo de Rayleigh, y las concentraciones isotópicas de las precipitaciones pueden simularse tanto para el clima moderno como para el del último máximo glacial. Ha sido pionera en este campo Sylvie Joussaume, con el modelo del laboratorio de meteorología dinámica del CNRS de París. Nosotros hemos seguido el mismo método basándonos en el modelo de la NASA en Nueva York. Los resultados convergen: en las regiones polares, las variaciones espaciales y temporales son absolutamente comparables. Ello justifica la utilización del gradiente espacial (el único al que los datos nos dan acceso) para reconstruir las series de temperaturas y da el límite de validez del termómetro isotópico (con una aproximación del 20 o el 30 %).



18 en función de la profundidad, para el período comprendido entre -10 000 y -40 000 años, ha permitido obtener un registro de variaciones de la temperatura en el centro de Groenlandia.(3)

Registros continentales, glaciales y marinos han hecho posible reconstruir en detalle la última desglaciación. El proceso de calentamiento está interrumpido por un regreso a un clima de tipo glacial. Este período, el Dryas reciente, está particularmente bien señalado en el Atlántico norte y en las regiones continentales adyacentes. La transición hacia el clima actual es muy rápida con, en Dye 3, un calentamiento de 7 °C en 50 años. Ha habido muchas discusiones acerca de la datación de este Dryas reciente: las dataciones con carbono 14 si- la edad estimada a partir del recuento de las capas anuales es de 11 550 años en GRIP y de 11 640 años en GISP. La rapidez de la transición hacia el clima actual queda confirmada.(3) Esta transición se produjo en menos de cincuenta años, mientras que el enfriamiento que condujo al Dryas reciente fue mucho más gradual. Unos pocos decenios son muy poca cosa para un cambio climático de gran magnitud. Y, no obstante, los hielos de Groenlandia nos revelan que ciertas características del clima pueden modificarse todavía más rápidamente. Nuestros colegas norteamericanos han escrutado con mayor detalle otros indicios que así lo atestiguan. A finales del Dryas reciente, bastaron 5 años para que el contenido de polvo, influido entre conocidas a partir de entonces con el nombre de sucesos de Dansgaard/Oeschger. En pocos decenios, el clima pasó de un estado glacial a condiciones más clementes, intermedias entre un clima glacial y el clima actual. El retorno a las condiciones frías fue mucho más lento; duró entre 500 y 2 000 años. Estas secuencias en forma de «dientes de sierra» se repitieron una decena de veces. El calentamiento asociado fue de 5 a 7 °C, la mitad del cual corresponde al paso de un clima glacial al clima actual. Los resultados de Dye 3 fueron acogidos al principio con cierto escepticismo. Luego, el sondeo de GRIP levantó todas las dudas: los sucesos de Dansgaard/Oeschger eran perfectamente reales. Ahora, estos sucesos han sido identificados en los

(3) S. Johnsen *et al.*, *Nature*, *359*, 311, 1992.
(4) K. Taylor *et al.*, *Nature*, *361*, 432, 1993.
(5) R. Alley *et al.*, *Nature*, *362*, 527, 1993.
(6) G. Bond *et al.*, *Nature*, *360*, 245, 1992.
(7) G. Bond *et al.*, *Nature*, *365*, 143, 1993.

sedimentos marinos del Atlántico norte.[6,7] Desde su descubrimiento, se sugirió que los cambios rápidos registrados en Dye 3 estaban estrechamente ligados a modificaciones de la circulación oceánica en el Atlántico norte. El climatólogo suizo Hans Oeschger, de la universidad de Berna, formuló la hipótesis de que existen dos tipos de circulación oceánica. Wally Broecker, de la universidad Columbia de Nueva York, propuso una descripción de dichas corrientes a escala del océano global. Actualmente, corrientes de superficie (Gulf Stream) transportan agua y calorías desde el ecuador hasta el Atlántico norte. Estas aguas se enfrían al calentar el continente europeo adyacente y se vuelven lo bastante densas como para sumergirse y formar aguas profundas que luego vuelven al sur e irrigan distintos océanos. En el periodo glacial, las aguas ecuatoriales no ascienden lo bastante hacia el norte como para, al enfriarse, adquirir una densidad que les permita hundirse.

Quedan así definidos dos modos, el modo actual «cálido», caracterizado por la formación de aguas profundas en el Atlántico norte, y el modo «glacial», en el cual éstas no se forman o lo hacen de un modo menos intenso. La transición rápida frío/caliente, característica de los sucesos de Dansgaard/Oeschger, correspondería a la puesta en marcha de esta circulación y al regreso a condiciones glaciales a su interrupción. Si este esquema seductor es conforme a la realidad, se debería encontrar la traza de dichos sucesos en los sedimentos marinos. Los paleooceanógrafos se pusieron manos a la obra...

Los primeros indicios de la existencia de una transición climática brutal los dio el análisis de los sedimentos marinos del Atlántico norte. Algunas muestras estaban interrumpidas por una serie de capas con restos calizos cuyo estudio reveló que procedían del zócalo del continente canadiense y de Groenlandia; son conocidas bajo el nombre de «capas de Heinrich», en honor al científico alemán que las documentó en 1988. Por su parte, Gerry Bond, de la universidad de Columbia, descubrió variaciones cíclicas del color del sedimento. Estos equipos, a los que se adjuntaron otros investigadores, entre los cuales Laurent Labeyrie, del Centro de débiles radiactividades de Gif-sur-Yvette, se asociaron y, a fines de 1992, desembocaron en una imagen coherente de estas distintas observaciones.[6] Se identificaron y cartografiaron seis capas de Heinrich entre -70 000 y -14 000 años y se confirmó su origen continental. Además, se descrubrió que correspondían a una disminución del oxígeno 18 del agua de mar. Estos dos elementos indican que dichas capas están ligadas a descargas masivas de icebergs (pobres en oxígeno 18) que se desprendieron del casquete norteamericano cuando éste aumentó hasta hacerse inestable. Estos desprendimientos masivos se produjeron al final de la fase de enfriamiento, periodo que dura entre 5 000 y 10 000 años. Las temperaturas oceánicas de la superficie de los océanos son entonces de 7 a 10 °C menores que las actuales. Después de cada descarga, el regreso a condiciones relativamente

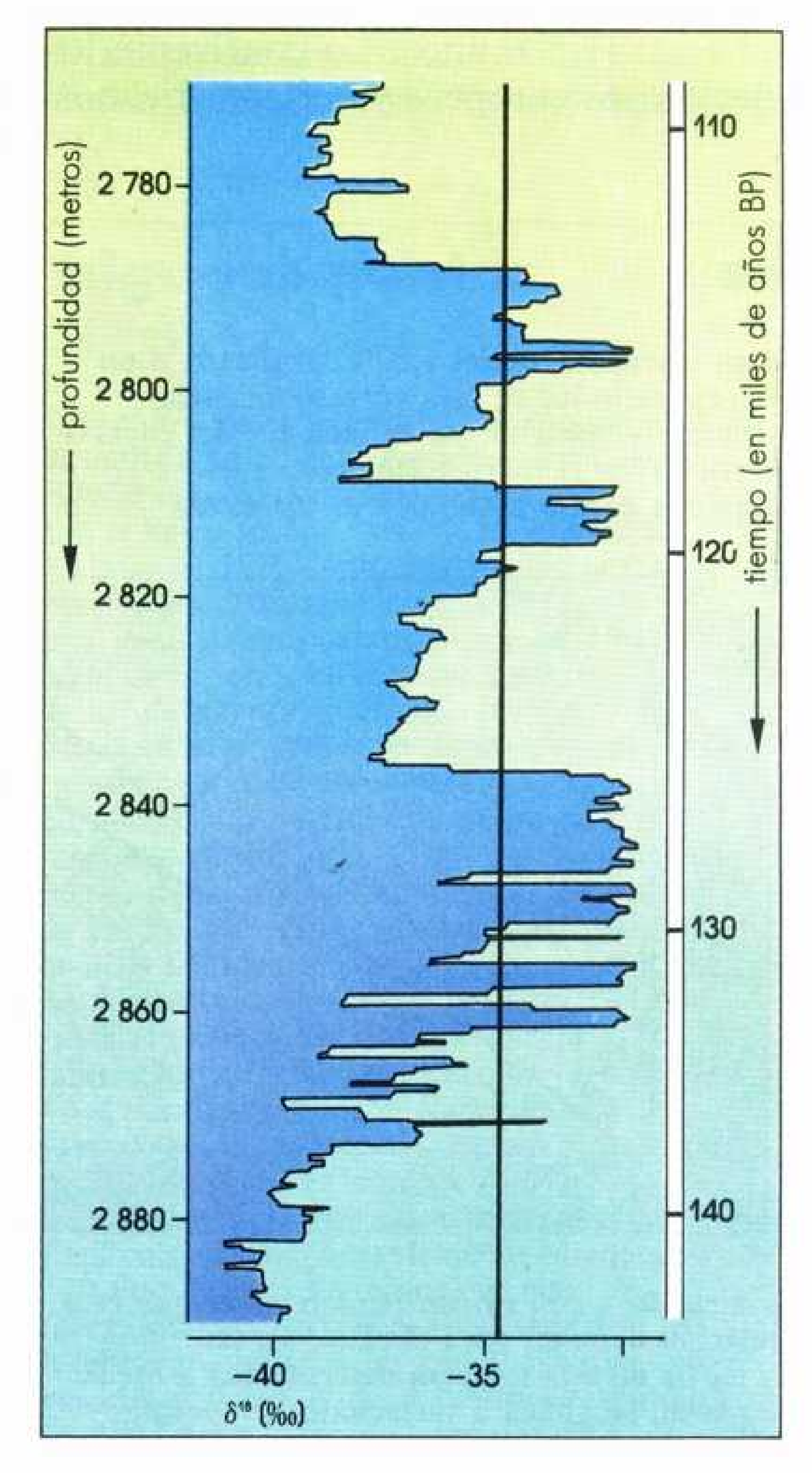


Figura 4. El análisis fino de las variaciones de la concentración de oxígeno 18 durante el último periodo interglacial (eemiense) entre -135 000 y -115 000 años ilustra la existencia de variaciones rápidas durante este periodo cálido. El clima estuvo caracterizado entonces por una serie de oscilaciones entre un nivel cálido (4 o 5 °C más que durante los últimos 10 000 años) y temperaturas de hasta 5 °C inferiores a las que conocemos actualmente (sobre todo entre -132 000 y -115 000 años). El nivel de -34,8 ‰ (indicado por un trazo) corresponde al valor medio de los últimos 10 000 años.

más cálidas es mucho más rápido. Encontramos así la estructura en «dientes de sierra» registrada en los hielos de Groenlandia y un enfriamiento del mismo orden que el estimado a partir del análisis de dichos hielos. Resulta tentador asociar los sucesos Dansgaard/Oeschger a los ciclos identificados en los sedimentos marinos del Atlántico norte. Esta etapa acaba de completarse en un estudio realizado por paleooceanógrafos y glaciólogos de GRIP y dirigido por Gerry Bond.[7] Efectivamente, hay una relación entre las descargas masivas de icebergs y las variaciones rápidas registradas en Groenlandia durante el periodo glacial. Aunque nos queda todavía mucho por saber acerca del acoplamiento entre el océano y los grandes casquetes glaciales, estas rápidas variaciones pierden con ello parte de su misterio.

Durante el verano de 1992 prosiguió el sondeo GRIP. A 2 800 metros, todos los indicios en nuestro poder indicaban que íbamos a entrar en el eemiense, el último periodo interglacial (entre -135 000 y -115 000 años). Este interglacial tenía unos cien metros de espesor. A medida que íbamos extrayendo muestras, presentíamos que íbamos a encontrarnos con sorpresas: las propiedades eléctricas del hielo, que dependen de las impurezas que éste contiene, no presentaban la estabilidad característica del hielo de los últimos 10 000 años; se descubrieron variaciones rápidas del tamaño de los cristales de hielo y de los diversos registros que indican el aporte de aerosoles continentales. Se esperaba pues con impaciencia la curva isotópica, que estuvo disponible en octubre de 1992.[8] Las sorpresas no se hicieron esperar; así lo indicaba el perfil del contenido de oxígeno 18 de los 3 000 metros de perforación, que permitían remontarse hasta hace 250 000 años (fig. 3).

En efecto, frente a la notable estabilidad del contenido de oxígeno 18 desde hace 10 000 años, el perfil de los 1 500 últimos metros parece muy agitado. No sólo en periodo frío, cosa que sabíamos ya, sino también en el último periodo cálido... El análisis fino de las variaciones del contenido de oxígeno 18 durante el último interglacial no deja ninguna duda al respecto, como lo indica la figura 4.[9] Los análisis de esta figura abarcan el periodo comprendido entre -140 000 años y -110 000 años, en el que figura el eemiense (entre -135 000 y -115 000 años). Se constata que hacia -130 000 años la desglaciación está salpicada de regresos hacia condiciones frías, bastante parecidas a los periodos glaciales, algo así como «Dryas recientes» de repetición. Las temperaturas máximas alcanzadas a fines de dicha transición son algo más cálidas, hasta 4 o 5 °C, que las de los 10 000 últimos años. El clima estaba caracterizado entonces por una serie de oscilaciones entre este nivel cálido, que parece constituir un techo, y temperaturas unos 5 °C inferiores a las actuales. Resumamos las características de este último interglacial: una amplitud de 10 °C, nunca más de 5 000 años sin un gran cambio climático, con un periodo estable más largo, hacia -122 000 años, correspondiente a un clima no muy distinto de un periodo glacial. En suma, unos

resultados muy inesperados.

Pero la curva del oxígeno 18 se establece a partir de muestras que constituyen un valor medio a lo largo de 55 centímetros, que representan 100 años, un periodo demasiado importante para que se puedan captar las transiciones sucesivas. Así, se preparó también un muestreo más detallado (2,5 cm), dando prioridad a un estudio fino de dos episodios fríos. Uno de ellos, bastante largo (750 años) está situado a fines de la desglaciación hacia -132 000 años. El otro, hacia -115 000 años, sólo es discernible en dos muestras, pero su análisis detallado proporciona unos resultados completamente inesperados (fig. 5). Se asiste a un enfriamiento estimado en 14 °C, que se se establece en unos veinte años, no dura más que 70 y es seguido por un retorno a un clima cálido, también en unos veinte años. Paralelamente, se observan unas modificaciones igual de abruptas y espectaculares en distintos indicadores de la circulación atmosférica, como la concentración de polvo o de calcio, que aumentan con la intensidad de los movimientos atmosféricos.

Todos estos índices atestiguan cambios drásticos de la circulación atmosférica y dan apoyo a la imagen de una excursión hacia un clima glacial. La sorprendente estructura del último interglacial debería ser confirmada, en un futuro próximo, por nuestros colegas norteamericanos, con el análisis del sondeo GISP II, terminado en julio de 1993.

¿Cuál es la representatividad geográfica de estos rápidos sucesos acaecidos en el centro de Groenlandia? Es difícil creer que no afectaran al Atlántico norte y a los continentes adyacentes. Debieron de dejar huellas en estas regiones. Por otra parte, partiendo de datos muy tenues, la posible existencia de rápidas variaciones durante este interglacial ha sido mencionada repetidas veces desde hace unos veinte años. Se ha vuelto a poner en marcha la caza de sucesos rápidos. Palinólogos y paleooceanógrafos se encuentran ya junto a sus microscopios y sus espectrógrafos de masas. Es muy probable que en los próximos años los rápidos sucesos del eemiense sean identificados y documentados por lo menos en las regiones del Atlántico norte. Es menos seguro, en cambio, que consigamos darles una rápida explicación.

Los hielos de Groenlandia, por lo tanto, nos han deparado un descubrimiento en el sentido profundo del término, algo a lo que nuestra comunidad no estaba preparada, algo que nadie había predicho. Somos cuarenta cofirmantes en la publicación donde se presentan estos resultados, pero apenas si hay un pequeño párrafo dedicado a la interpretación de las excursiones frías y de su carácter súbito. La desaparición de la Antártida occidental, cuya estabilidad es puesta a veces en tela de juicio porque el zócalo está por debajo del nivel del mar, ¿pudo ser el disparador de sucesos en el Atlántico norte? Esta pista es, admitámoslo, poco plausible. No hay huellas de esta eventual desaparición en el hielo de Vostok. En cualquier caso, esta desaparición durante el eemiense habría sido única. ¿Un cambio de circulación del Atlántico norte? No es posible aducir la descarga masiva de icebergs: los grandes casquetes de América del norte habían desparecido ya por lo menos en la segunda parte del eemiense. Pero, ¿no es posible que un océano más caliente favoreciera las transferencias de vapor a altas latitudes? El exceso de precipitaciones provocaría entonces una disminución de densidad por aporte de agua dulce y una interrupción de la formación de aguas profundas, lo cual es sinónimo de enfriamiento en el Atlántico norte.

Una tal hipótesis significaría que el océano es mucho más inestable y que su circulación puede modificarse mucho más rápidamente de lo que piensan los oceanólogos. ¿Una hipótesis gratuita? Ya no desde la publicación de los resultados GRIP. En el mismo número de la revista *Nature*, dos investigadores de Princeton, Suky Manabe y Ronald Stouffer, especialistas en modelización del clima, predicen un tal cambio de circulación en el caso del calentamiento climático derivado de una cuadriplicación de la concentración de dióxido de carbono. Estas simulaciones refuerzan el mensaje que nos transmiten los hielos de Groenlandia en lo tocante a nuestro futuro clima. En efecto, el periodo del eemiense se considera a veces como un posible análogo del clima de nuestro planeta en el caso de que se produjera un calentamiento climático a resultas de un aumento de los gases de efecto invernadero. Pero es la primera vez que tales transiciones se observan.

La estabilidad del clima actual, que prevalece desde fines de la útima glaciación hace unos 10 000 años, también parece excepcional. En realidad, esta estabilidad no ha tenido equivalente durante los 250 000 últimos años, en los que los periodos fríos y cálidos se han sucedido a escala del planeta. Se trata de una enorme sorpresa para los especialistas en climas del pasado. El clima cálido, que era el de una parte del eemiense y hacia el cual podríamos dirigirnos, ¿será tal vez más inestable que el clima actual?[11] ■

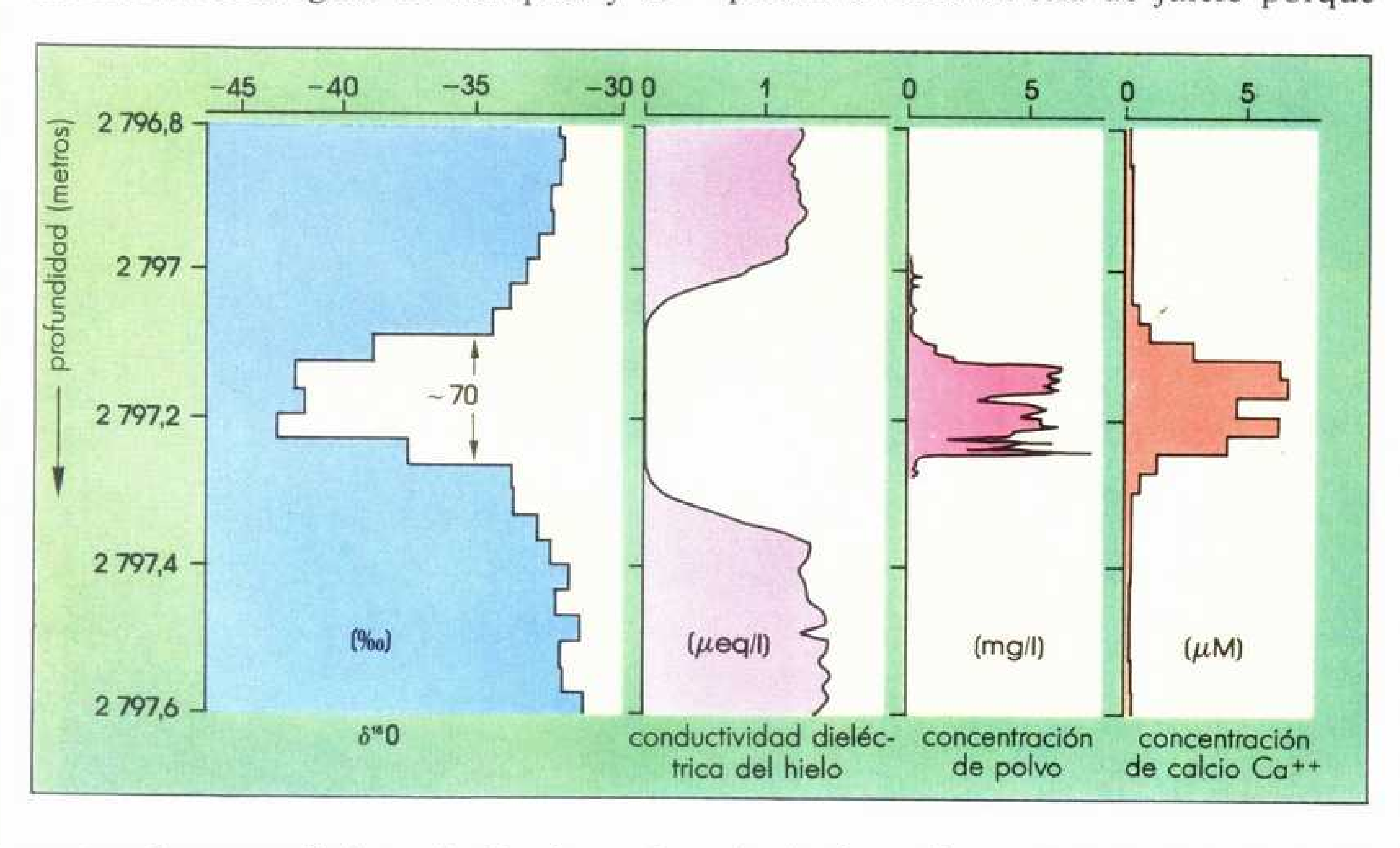


Figura 5. Estas curvas ilustran la excursión fría catastrófica, acaecida hace 115 000 años y registrada en un metro al menos de hielo (un poco más de 200 años). La curva de la izquierda (oxígeno 18) muestra las variaciones muy rápidas de la temperatura. Se observa un enfriamiento de 14 °C, que se estableció en unos veinte años, no duró más que 70 y fue seguido por un retorno hacia el clima cálido. Los tres parámetros de la derecha (conductividad, concentración de polvo y de calcio) indican un cambio de la circulación atmosférica, más intensa en periodo frío. Se constata que las variaciones de temperatura están acompañadas de un cambio de circulación atmosférica igual de rápido. Obsérvese que las medidas relativas a estos tres parámetros se realizaron sobre el terreno. A tal efecto, se abrió una zanja científica como prolongación de la de sondeo.

(8) W. Dansgaard *et al.*, *Nature, 364*, 218, 1993.
(9) GRIP Project Members, *Nature, 364*, 203, 1993.
(10) J. Jouzel *et al.*, *Nature, 364*, 407, 1993.
(11) Los autores dan las gracias a la Fundación europea de la ciencia, a las Comunidades europeas y a las fundaciones nacionales que han hecho posible la realización del proyecto GRIP, así como al conjunto de técnicos e investigadores que han participado en él.

PARA MÁS INFORMACIÓN:

- *Mundo Científico*, número especial «El efecto invernadero», nº 126, julio-agosto, 1992.
- *Science et Vie*, número especial «Atmosphères, atmosphères», mayo, 1991.
- J.-C. Duplessis y P. Morel, *Gros temps sur la planète*, Ed. Odile Jacob, 1990.
- S. Joussaume, *Climat, d'hier à demain*, CNRS Editions y CEA, 1993.
- C. Lorius, *Glaces de l'Antarctique, une mémoire, des passions*. Ed. Odile Jacob, 1993.

LUIGI LUCA CAVALLI-SFORZA: GENEALOGÍA DE LA HUMANIDAD

«PORQUE LUGI LUCA CAVALLI-SFORZA SINTETIZA POR PRIMERA VEZ LAS BASES TEÓRICAS DE LA GENÉTICA DE POBLACIONES Y PARTICIPA EN EL DESCUBRIMIENTO DEL INTERCAMBIO SEXUAL EN LAS BACTERIAS, ELEMENTO CLAVE EN EL DESARROLLO DE LA GENÉTICA MOLECULAR EN LOS ÚLTIMOS TREINTA AÑOS...» «POR SU TRAYECTORIA CIENTÍFICA, MODÉLICAMENTE INTERDISCIPLINARIA...» «POR SU VISIÓN HUMANÍSTICA Y A LA VEZ CIENTÍFICA A LA HORA DE CONSIDERAR LA INTELIGENCIA Y LAS RAZAS HUMANAS, YA QUE PARA LUIGI LUCA CAVALLI-SFORZA EL CONCEPTO DE RAZA ESTA FALTO DE SENTIDO BIOLÓGICO Y, POR TANTO, RECHAZA CON CRITERIOS CIENTÍFICOS TODA CONCEPCIÓN RACISTA...»

CARLOS LÁZARO ALCAY

■

Éstos fueron algunos de los argumentos que llevaron al consejo asesor del Institut Català D'Estudis mediterranis, reunido en París, a otorgar, por mayoría absoluta, el V Premi Internacional Catalunya 1993 al profesor Luigi Luca Cavalli-Sforza.

Este premio, dotado con 80 000 ecus, se destina a aquellas personas que han contribuido decisivamente, con su trabajo creador, a desarrollar los valores culturales, científicos o humanos a lo largo del mundo, y constituye uno de los más altos honores que la Generalitat de Cataluña tiene a bien conceder, con carácter anual (fig. 1).

La gran talla de las personalidades a las que ha sido concedido (Karl R. Popper, Abdus Salam, Jacques-Yves Cousteau, Mstislav Rostropovich), así como el alto nivel científico y humano de su jurado y Consejo Asesor, han hecho de este premio uno de los más prestigiosos existentes, codeándose con otros de más antigua presencia en este ámbito.

Cavalli-Sforza, genetista italiano, nacido en Génova en 1922, empieza dirigiendo sus esfuerzos al campo de la genética bacteriana, donde participa en el descubrimiento del intercambio sexual en las bacterias.[1]

Su aportación resulta decisiva en la observación de que determinadas cepas de *Escherichia coli* infértiles F(-) son capaces de adquirir una fertilidad ilimitada al ponerse en contacto con cepas de *E. coli* fértiles F(+). Un ejemplo de lo que más tarde se conocería con el nombre de «plásmidos», porciones de ADN que se pueden inocular a otra bacteria dando lugar a un comportamiento distinto al que poseía, como ocurre en la aparición de resistencias a antibióticos o en ingeniería genética.

«*Saturado de matemáticos teóricos*», según cuenta Cavalli-Sforza, desvía su atención hacia la genética de poblaciones. «*He sido atraído hacia el estudio de la evolución por consideraciones que llamaríamos estéticas: la belleza de la teoría de la evolución*».

En Pavía tiene como maestro a Adriano Buzzati-Traverso, «*me hizo descubrir la ciencia de la herencia, y también me empujó, aunque de forma totalmente involuntaria, a ejercer la genética en el sentido más literal de la palabra, presentándome a su sobrina Alba, que más tarde sería la madre de mis hijos*», y pasa a interesarse por todo aquello referente a la genética y a la evolución de las poblaciones humanas, observando que en determinados lugares aislados

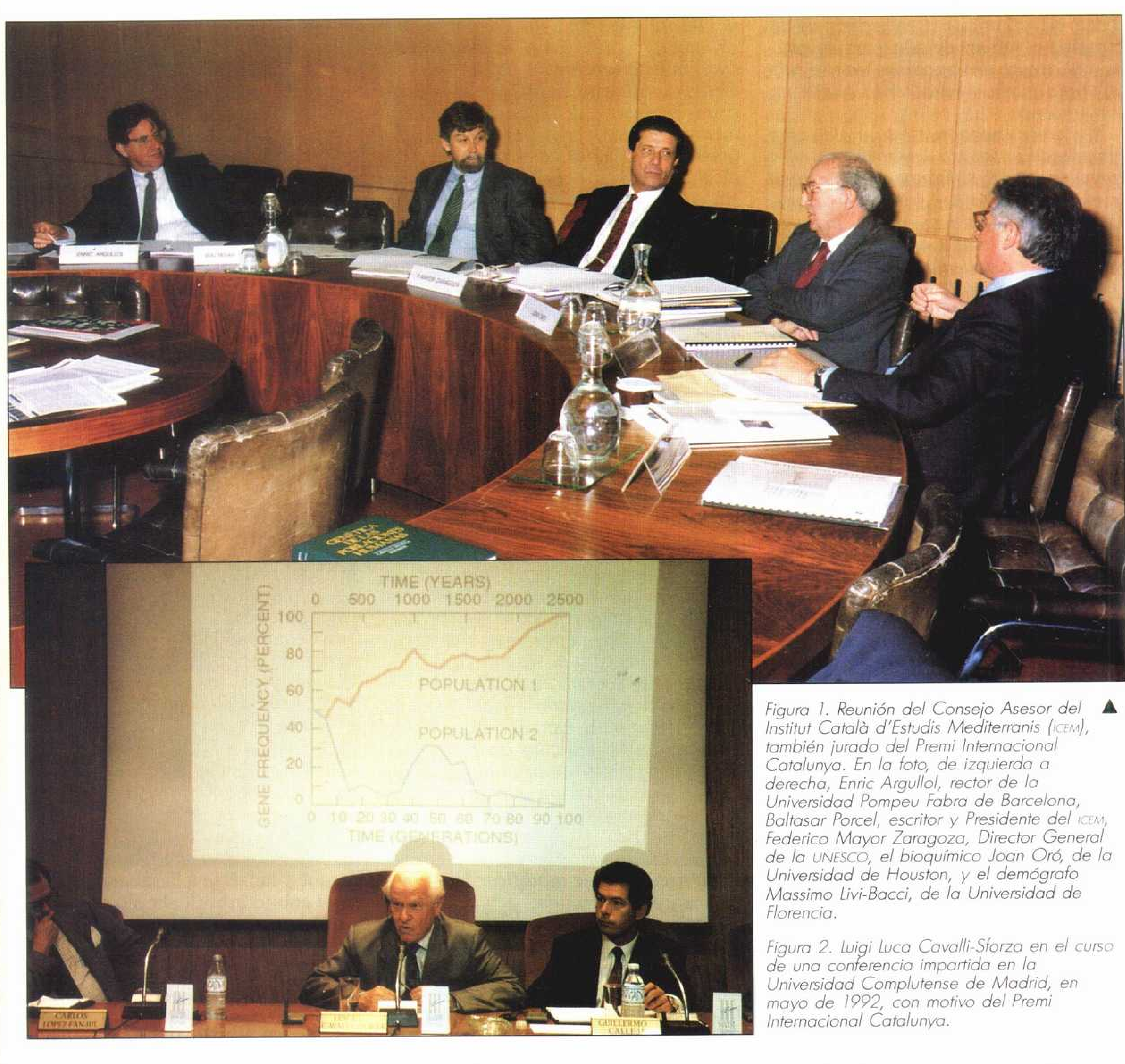


Figura 1. Reunión del Consejo Asesor del Institut Català d'Estudis Mediterranis (ICEM), también jurado del Premi Internacional Catalunya. En la foto, de izquierda a derecha, Enric Argullol, rector de la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona, Baltasar Porcel, escritor y Presidente del ICEM, Federico Mayor Zaragoza, Director General de la UNESCO, el bioquímico Joan Oró, de la Universidad de Houston, y el demógrafo Massimo Livi-Bacci, de la Universidad de Florencia. ▲

Figura 2. Luigi Luca Cavalli-Sforza en el curso de una conferencia impartida en la Universidad Complutense de Madrid, en mayo de 1992, con motivo del Premi Internacional Catalunya.

existe una frecuencia relativamente elevada de ciertos caracteres ligados a la herencia.(2)

Su primer trabajo de campo lo dedica al análisis de una población del valle de Parma, en Italia,(3) demostrando que la variación genética que promueve la dominancia de ciertos genes que se oponen a la adaptación (deriva genética), viene dominada por dos factores: el tamaño de la población y la migración. Utiliza con este fin técnicas de simulación por ordenador para describir la historia de la consanguinidad en Italia y caracteriza las causas selectivas y aleatorias de los grupos raciales mediante información que extrae de diversas fuentes, desde documentos de consanguinidad hasta archivos parroquiales.

En 1966 enseña genética en la universidad de Padua y se pregunta sobre la naturaleza del estudio genético que viene realizando.(4) «*En el 99 % de su historia, la humanidad ha vivido de la caza y la recolección. Los pigmeos son uno de los pocos ejemplares todavía existentes de los pueblos que practican este estilo de vida*».

A finales de la década de los 60 y a principios de los 70, organiza una serie de expediciones científicas a África con el fin de analizar varios aspectos de la evolución de las poblaciones pigmeas. Su interés no es exclusivamente el de laboratorio, sino que se desplaza para convivir con estas poblaciones y para observar su forma de vida, su estructura social, su interacción con el medio natural así como su relación con otros pueblos agricultores (fig. 2).(5)

En un intento de llegar más allá de lo que constituyen simples datos analíticos extraíbles de una muestra sanguínea, enlaza las observaciones sobre el terreno con sus conocimientos genéticos para establecer nexos de unión entre un estudio de tipo antropológico y la que es su disciplina. En el momento en que le fue comunicada la obtención del V Premi Internacional Catalunya, se hallaba en una isla del este de Malasia realizando estudios en una población de la zona.(6) Sus relatos presentes en el libro *Chi siamo*, de reciente publicación, tienen la dimensión científica a la vez que humana, en la tradición de la mejor literatura de grandes viajes.(7) Su primer contacto con los pueblos africanos resulta un verdadero fracaso: en su primera cita con un grupo de pigmeos descubre al llegar que todos han escapado al bosque. Alguien había dado la voz de que aquel joven investigador era en rea-

CARLOS LÁZARO ALCAY es licenciado en medicina y cirugía, realiza sus trabajos de investigación en el Departamento de farmacología y psiquiatría de la Universidad Autónoma de Barcelona, y prepara su doctorado en neurociencias.

lidad un «likundu», una especie de demonio, y habían dejado para su estudio al «tonto del pueblo», «*no se sabe si como burla o para ver lo que le habría hecho*».

«Me *preocupaba que esta mala fama, creada de un modo improvisado e imprevisto, se difundiera por toda la zona, creando el vacío por donde yo pasara... Me resultó útil el recuerdo de un cuento que me relataba mi padre: los pigmeos, me dijo, tienen una gran pasión por la sal, como las cabras. Llevé entonces conmigo una gran cantidad de sal, y evité en lo posible, encarecidamente, recurrir a intermediarios. El éxito fue completo*».

En otras ocasiones Cavalli-Sforza analiza los conocimientos que sobre el comportamiento animal poseen estos pueblos, y los compara, no sin cierta ironía, con aquellos últimos descubrimientos científicos. «*Su mayor competencia es la etología, el comportamiento animal, que para ellos, como cazadores, es fundamental. Son, en sustancia, los únicos hombres en posición de sobrevivir con sus propios medios en el bosque*».

«H*ace algunos años vi una escena bellísima en una película de óptima calidad científica: un pigmeo enseña a un niño que los chimpancés, para comer termitas, de las que son muy golosos, toman bastoncillos y abren con ellos las galerías construidas por estos insectos en la corteza del tronco del árbol... El descubrimiento de que los chimpancés saben utilizar instrumentos, de los que el bastoncillo de leño empleado para desanidar las termitas es el más importante, ha suscitado mucho clamor en el mundo científico estos últimos años... ¡Los pigmeos lo saben desde hace siglos o milenios! aunque ellos prefieren freír las termitas antes de comerlas*».

Todos sus análisis sobre el estilo de vida de los pigmeos están salpicados de anécdotas con las que intenta reforzar la idea que está transmitiendo. Sobre su solidaridad, recuerda: «*Un pigmeo fue requerido por un agricultor para dar caza a un gorila —en circunstancias similares recurren a los pigmeos que son muy buenos en la caza y valientes—. El pigmeo había hecho frente al gorila con una lanza, infringiéndole una herida mortal, pero en la escapada había recibido un mordisco terrible en la región lumbar que le había paralizado la pierna. En la selva, no estar en posición de caminar equivale a una muerte segura. En estos casos la banda se hace cargo del desafortunado; he visto ciegos o enfermos graves que no abandonaban*».

En el aspecto genético teoriza sobre la estatura de este pueblo: «*No sabemos si se han hecho pequeños con el tiempo o si lo han sido siempre... Los primeros hombres, hace dos o tres millones de años, eran muy pequeños, incluso más que ellos. En el mundo industrial, la estatura media ha aumentado en los dos últimos siglos, fundamentalmente porque se ha mejorado la alimentación... Observamos que los pueblos que habitan los bosques tropicales, donde el clima es muy húmedo, en general son siempre pequeños: es así tanto en la India como en el sur de Indonesia, en las Filipinas y en Nueva Guinea, en los Mayas de América central o en los habitantes de la selva tropical brasileña. Con una humedad del 100 %, la sudoración, que es nuestro mecanismo de defensa normal contra el calor excesivo, no es muy eficaz o no lo es en absoluto, porque el sudor no se evapora sino que permanece líquido, no se enfría... El pigmeo tiene otra ventaja: siendo minúsculo tiene una menor masa muscular, especialmente en las piernas y en los brazos, produce menos calor internamente y por tanto gasta menos para mantenerse en equilibrio... El pigmeo, al moverse, hace un esfuerzo menor al de un individuo más grande que él, porque el peso que debe mover es más pequeño... La estatura pequeña es una adaptación biológica a la vida de la selva... Aunque son pequeños, su cabeza es tan grande como la nuestra y la nariz la más ancha del mundo. Esto es de nuevo una adaptación a la selva: las narices pequeñas sirven para inspirar el aire cuando es muy frío, de forma que tenga tiempo de calentarse antes de llegar a los pulmones; pero si el aire está caliente y húmedo como en la selva, no hay ninguna necesidad de modificar la temperatura y la humedad*».

Las tribus se comportan de una forma endógama, de modo que del 80 al 90 % de los matrimonios acontecen entre los que la integran; en el caso de los pigmeos, hay un motivo económico: agrandar el territorio en el que puedan cazar hace que busquen el matrimonio con integrantes de su grupo que vivan alejados. Esto comporta una menor incidencia de consanguinidad y aumenta el horizonte genético.

EXISTEN ACTUALMENTE POQUÍSIMAS POBLACIONES DE CAZADORES-RECOLECTORES EN EL MUNDO

■

El impacto de la continua instigación a la que se ven sometidos por parte de las sociedades industrializadas, la explotación de los bosques tropicales, elemento principal para un estilo de vida que se sustenta en la interacción con el medio natural, ha diezmado a estos habitantes de los bosques.

Otras veces, bienintencionadas iniciativas de instituciones religiosas o humanitarias crean un cambio en su inventario ideológico que resulta ser un camino sin retorno, la facilitación de medios provenientes de las culturas occidentales lleva a menudo a una pérdida de los conociminentos ancestrales que aseguran la vida en la selva. El que suscribe este trabajo ha podido comprobar cómo ciertos pobladores de la cuenca del río Orinoco han perdido la capacidad de fabricación de curare, elemento que utilizaban tradicionalmente para provocar una parálisis muscular en los animales a los que daban caza. Algunos de sus miembros pasan de ser orgullosos guerreros a vagar de cualquier forma por las ciudades lindantes con el bosque tropical, alejados de su medio y sin una formación que les permita desenvolverse en esta otra selva que es el mundo industrial. Son allí reconvertidos en mano de obra barata para factorías, o bien pasan a engrosar el número de indigentes y marginados.

Gran cantidad de huesos fosilizados, pertenecientes a especies en extinción, han sido hallados en los últimos tiempos. Tal vez la osamenta más famosa sea la conocida como Lucy —nombre otorgado por los arqueólogos a una perteneciente al género *Australopitecus* (un antecesor común a nosotros y a los simios), en honor de una conocida canción de los Beatles—. El *Australopitecus* es el primero en abandonar el bosque y lanzarse a la sabana, olvidando el cobijo arborícola: no se conocen bien las causas que lo empujan a cometer tal desafío, tal vez nuestro ilustre antecesor era el loco del grupo (fig. 3).

Cavalli-Sforza apunta el hecho de que numerosos ejemplares fósiles se hayan perdido en China, donde han venido siendo utilizados tradicionalmente como reconstituyente, conocidos como «huesos de Dragón», para la fabricación de los cuales es preciso pulverizar huesos fosilizados. En estos fósiles es posible visualizar al microscopio el ADN en el interior de la célula.

La cuestión sobre en qué momento se empezaron a establecer las diferencias entre el simio y el hombre, ha puesto en marcha métodos de laboratorio para la identificación de grupos de especies. Para ello fueron primeramente utilizadas las proteínas, que son unas moléculas constituidas por otras submoléculas más pequeñas, los aminoácidos. Si observamos una proteína existente en varias especies, veremos que existen diferencias cuantitativas en el número de aminoácidos que la componen. Esto guarda una relación directa con la diferencia genética entre los organismos



Figura 3. Luigi Luca Cavalli-Sforza. (Foto autor.)

comparados: a mayor diferencia entre las moléculas, mayor distancia en el árbol genealógico.

De esta forma podemos encontrar aquellas especies que se nos parecen más. La separación entre hombre y chimpancé ocurre antes de la que ocurre entre gorila y hombre, y ésta es más vieja que la que acontece entre orangután y hombre, aunque los tres se nos parecen. En Malasia la palabra Orang Utan era utilizada por los aborígenes para designar a su vecino de la selva: Orang-Utan significa hombre de la selva.

Aparecen así tres antepasados en orden de antigüedad. El *Homo habilis*, un cazador, se distingue por su especial capacidad en el manejo de los instrumentos, y por el hecho de que comparte la presa, otra diferencia de comportamiento respecto a los simios; el *Homo erectus*, con una posición más erguida, se caracteriza por un mayor desarrollo cerebral y por el uso del fuego; y el *Homo sapiens*, del cual se conocen las subespecies *Neanderthalensis* y *Cromagnon*.

El hombre de Neanderthal tuvo que adaptarse a condiciones climáticas muy frías, ya que durante su periodo ocurrieron varias glaciaciones. Habitaba en cavernas, en las que se han hallado huesos fragmentados, por lo que se baraja la posibilidad de que practicara la necrofagia, muy difundida en la historia del hombre, segun apunta Cavalli-Sforza. Aunque también podía constituir una forma de defender a los cadáveres de los depredadores, a la vez que se eliminaba el olor causado por la descomposición, para seguir así habitando la misma caverna.

El primer asentamiento del hombre moderno ha sido situado en Oriente Medio y fechado en torno a hace unos 100 000 años, en coexistencia con los Neanderthales.[8] El hombre moderno se diferencia principalmente por su enorme interés artístico, el uso del arco, los instrumentos de pesca y los vestidos de pieles, afición que por desgracia para algunas especies no han perdido algunos de sus integrantes.

El tristemente desaparecido genetista Allen Wilson trabajó en la universidad de Berkeley sobre un modelo que resultó de gran utilidad en el estudio de la evolución. Se trata del análisis del ADN contenido en las mitocondrias, similar al utilizado previamente con las proteínas: la mayor diferencia en las secuencias de ADN se daría entre los individuos más alejados. Wilson utilizó para este fin las mitocondrias, elementos celulares especializados en la creación de energía dentro de la célula. Su morfología recuerda a la de una bacteria, y probablemente lo fue en su inicio, una bacteria que consiguió una simbiosis perfecta con el resto de la célula.Las mitocondrias contienen un cromosoma más pequeño que el presente en el núcleo celular que es trasmitido a los hijos exclusivamente por la madre.

De esta forma se establecieron diferencias genéticas entre pobladores de los distintos continentes, observándose que las existentes entre africanos y no africanos eran mayores de las que se pudieran establecer entre cualquier grupo intercontinental.

Ahí aparece una mujer africana a la que los científicos o los periodistas que difundieron la noticia denominaron Eva: su existencia se fechó entre unos 150 000 y 200 000 años. Por supuesto, nunca una mujer anduvo sola por la faz de la tierra: simplemente las líneas mitocondriales del resto de las mujeres de aquel tiempo se extinguieron.

De forma análoga se podría establecer una fecha y lugar para un Adán, si se utilizara para el estudio el cromosoma «Y» que está presente en el ADN nuclear del varón. La hipótesis de Cavalli-Sforza se basaría en ADN nucleares teniendo en cuenta la tasa de mutaciones, la deriva genética y las migraciones.

LAS MUTACIONES CONSTITUYEN LA BASE DEL «RELOJ MOLECULAR»

■

El ADN está sometido a una intensa actividad de copia, por la cual es transmitido a las generaciones venideras. Tomemos el ejemplo de algunos manuscritos medievales, en los que los monjes, al copiar, cometieron fallos por no conocer bien la lengua que estaban transcribiendo y dibujaban letras de forma idéntica a la que veían en el original: esos pequeños errores pueden dar lugar a interpretaciones diversas. Cavalli-Sforza se basa en el análisis de una poesía escrita en el lecho de muerte por un monje irlandés del siglo VI para enfatizar este punto.

No siempre el cambio de una letra será fatal para la interpretación, como sucede en las mutaciones. Sin embargo, en el caso de los genes puede ocurrir que

(1) G. Bonezzi, *et al.*, *G. Batt. Immunol.*, *29*, 20, 1943.
(2) A. Buzzati-Traverso, *et al.*, *Memorie Ist. It. Idrobiol*, 2, 219, 1945.
(3) L. Cavalli, *et al.*, *Atti Ass. Genet. It .*, *5*, 1, 1959.
(4)L. Cavalli, *Atti A.G.I.*, *11*, 3, 1966.
(5) L. Cavalli, *African Pygmies*, Academic Press, 1986.
(6) Cavalli-Sforza ha sido el promotor y es el director del Poyecto de la Diversidad del Genoma Humano, que pretende recoger y almacenar material hereditario de numerosos individuos de gran diversidad de poblaciones, que podrían ser explicados con las técnicas genéticas del futuro.
(7) Luca e Francesco Cavalli-Sforza, *Chi siamo. Storia della diversità umana*, Mondadori, 1993.
(8) L. Cavalli, *et al.*, *Science*, vol. 259, 1993, p. 639-646.

el error dé lugar a ciertas enfermedades, como la talasemia *minor*, una forma de anemia frecuente en Cerdeña, por lo cual se conoce como talasemia *minor* del Mediterráneo. Dado que las mutaciones tienen lugar, como promedio, una vez de cada cien mil, a lo largo de los años se acumulan y puede medirse la distancia genética en base al número de mutaciones que separan a dos individuos. Una nueva entrega de lo que Cavalli- Sforza denomina «el reloj molecular».

Una vez producida la mutación, ésta será mantenida en el grupo siempre que sea acompañada de una supervivencia de los individuos que la poseen, de forma que como Cavalli-Sforza dice «*la mutación propone, la evolución dispone*». Así, algunas mutaciones son ventajosas ya que representan un cambio que mejora la adaptación al medio, como la piel morena en los países en los que hace sol, a modo de protección para las radiaciones del astro rey.

En el caso de la transmisión de mutaciones genéticas, puede ocurrir que una alteración pase a los descendientes con una frecuencia que no sea producto de los cambios adaptativos: aquí inerviene la suerte. Este es el caso de la deriva genética, en la que unos pocos individuos que presentan una cierta secuencia génica «ganan», de forma casual, a aquéllos que no la poseen, imponiendo, a la larga, su carácter genético dentro de la población.

Este hecho es particularmente importante en pequeñas poblaciones aisladas, como observa Cavalli-Sforza en los estudios realizados en el valle de Parma.(3) En esta línea, el genetista japonés Motoo Kimura, contradiciendo a Darwin, afirma: «*La evolución no es la supervivencia del más adaptado, sino también la del más afortunado*».

En la historia de la humanidad, las migraciones han sido numerosísimas, y no han sucedido, como ocurre en naturaleza, hacia lugares cercanos, sino a largas distancias, gracias a la gran capacidad del hombre para desplazarse por medios por él mismo ideados. Las migraciones tienen así una importancia capital en el análisis de la evolución de la especie.

Por continentes, se cree que, tomando como punto de partida el africano, los homínidos pasaron el istmo de Suez para llegar a Asia y posteriormente a Europa, hace alrededor de un millón de años. Australia fue primeramente poblada por grupos procedentes del sureste asiático hace unos 40 000 años. En América, los primeros vestigios humanos se hallan en Alaska y datan de hace unos 15 000 años.

Según el Consejo de investigaciones médicas de Londres, los vascos serían los habitantes más antiguos de Europa, siendo descendientes directos del hombre de Cromagnon. Los agricultores del Neolítico llegaron con su cultura indoeuropea, procedente de Oriente Medio, a Europa en una expansión lenta. Esta hipótesis fue avanzada por el inmunólogo inglés Arthur Mourant basándose en la frecuencia de Rh negativo presente en esta población.Seguramente existieron otras muchas migraciones, pero al no tener éxito en sus asentamientos, no quedaron vestigios para su estudio y clasificación.

Los hombres del Paleolítico, así como ocurre en las tribus de cazadores-recolectores que todavía subsisten en el planeta, no debían tener una mala calidad de vida —de acuerdo con el antropólogo Claude Lévi-Strauss, «*no es más rico aquel que más tiene, sino el que de menos precisa*»—; en aquellos hombres como en éstos se han podido hallar evidencias de un nivel de bienestar óptimo. Disponían de instrumentos adecuados para su trabajo, utillaje casero o pieles de abrigo, e incluso quedaba un lugar importante para dar satisfacción a sus inquietudes artísticas.

Hace unos 10 000 años tuvo lugar una auténtica revolución que a la larga tendría un gran impacto en la historia de la humanidad y por extensión de todo el planeta: se trata de la agricultura y la ganadería, la capacidad de utilizar el medio ambiente al capricho del usuario para obtener alimentación, dando lugar, por un lado, a un gran crecimiento demográfico y, por otro, a una mayor extensión de terreno utilizado para vivir por el hombre (fig. 4).

Años transcurridos	*Etapa cultural*	*Área poblada*	*Densidad estimada por km²*
1 000 000	Paleolítico Inferior		0,00425
300 000	Paleolítico Medio		0,012
25 000	Paleolítico Superior		0,04
10 000	Mesolítico		0,04
6 000	Poblados agrícolas y comienzos de la civilización urbana		1,0ª 0,04
2 000	Poblados agrícolas y urbes		1,0

Figura 4. El incremento de la población mundial. Fuente: L.L Cavalli- Sforza, W.F. Bodmer, Genética de las poblaciones humanas, Ediciones Omega, Barcelona, 1981.

El agricultor es sedentario, por lo que el número de hijos pequeños no le representa un problema para sus desplazamientos: bien al contrario, contra más crece la familia, más brazos trabajan la tierra.La agricultura constituye no sólo la capacidad de cultivar una gran cantidad de plantas que el hombre ya debía consumir en estado salvaje con anterioridad, sino también un control sobre la cantidad y la calidad.

De nuevo Cavalli-Sforza hace gala de su capacidad para confrontar distintas disciplinas en pos de extraer conclusiones objetivas. En este caso se sirve de los conocimientos arqueológicos, asociándose con Albert Ammermann, preocupado por la trascendencia de este fenómeno sobre las migraciones.(9) Ciertamente, «*en situaciones en las que el número de los individuos que com-*

	(P)oblación total (m)illones)
(0)425	0,125
2	1
	3,34
	5,32
	86,5
	133

Años después J. C.	Etapa cultural	Área poblada	Densidad estimada por km²	Población total (millones)
1650	Agricultura e Industria		3,7	545
1750	Agricultura e Industria		4,9	728
1800	Agricultura e Industria		6,2	906
1900	Agricultura e Industria		11,0	1,610
1950	Agricultura e Industria		16,4	2,400
2000	Agricultura e Industria		46,0	6,270

ponen una población aumentaba de forma importante, empujaban a parte de la población a emigrar y ocupar otros países». Es de recibo, asimismo, preguntarse sobre lo que ocurre a aquéllos que mantienen el estilo de vida paleolítico, ya que la agricultura y la ganadería encierran una amplia destrucción de terreno forestal que les va limitando su entorno.

La migración supone una ventaja cultural transmisible a los descendientes. Los primeros hombres modernos se podrían estimar de 20 000 a 100 000 personas, hace unos 100 000 años. Al final de las expansiones, hace de 10 a 15 mil años, eran entre 5 y 10 millones.

Otra ventaja cultural que ha permitido el desarrollo ha sido la domesticación de animales, como el caballo, que ha ayudado a la difusión de pastores nómadas de Rusia meridional hacia Europa, del mismo modo que ocurre con el camello en África o la llama en Sudamérica. La mejora en los medios de transporte, con la invención de la rueda y la vela, o la capacidad de navegación oceánica, y finalmente las conquistas propiciadas por el desarrollo de innovaciones militares, suponen también ventajas para el grupo que las posee.

La lectura de los textos de Cavalli-Sforza no se queda en el conocimiento del carácter génico-histórico de la humanidad, sino que evoca la extrapolación de estos fenómenos hacia el tiempo presente, como en este caso, ¿cuáles serían hoy las ventajas culturales que permiten la preponderancia de ciertos grupos sobre otros? La información, el desarrollo armamentístico, las nuevas tecnologías, los sistemas de trabajo...

En cuanto a la reconstrucción de las secuencias de migraciones propiciadas por la agricultura y el pastoreo, aparte de las que se dirigen a Europa, su trabajo apunta, en grandes trazos, por un lado hacia Irán, Pakistán e India. En África se definen claramente, una hacia el norte proveniente de Oriente Medio, y otra más reciente hacia Arabia meridional y Etiopía. En China, limitada al norte y al oeste por el desierto y por la estepa, respectivamente, aparece un desarrollo agrícola basado en el mijo, y en el sur otro basado en el cultivo de arroz; ello concuerda con la diferencia genética hallada entre los habitantes del norte y del sur del país.

En Japón la expansión no parece asociarse con la agricultura. Recordemos que hace de 10 000 a 15 000 años la isla no era tal, sino que estaba unida a tierra firme, y quizá por ello muestra un espectro de similitud genética con los habitantes de Corea.

En los años 1950, Joseph H. Greenberg estableció cuáles son los fundamentos linguísticos que sirven como sustrato a las casi 400 lenguas de la familia Bantú en África. Estas lenguas guardan un profundo parentesco y se corresponden a las fronteras tribales allí presentes, de forma que descienden de una lengua común utilizada por los antiguos agricultores de Nigeria y Camerún que se distribuyeron hace unos 3 000 años hacia el centro y el sur africanos.

En 1860 con la publicación de *El Origen de las Especies*, Charles Darwin ya aventuró el hecho de que el árbol evolutivo genético podía ser paralelo al árbol linguístico.Este hecho ha sido ratificado por Cavalli-Sforza; es decir, existe un importante grado de correlación entre distribución de lenguas y distribución de genes, con sólo dos excepciones. Una, si ocurre una sustitución de lengua debido a una imposición por conquista o a una inmigración masiva que diluya la lengua ancestral, dando lugar al abandono de ésta. Segunda, si existe una sustitución de genes al mezclarse la población inmigrante con otra autóctona o una nueva inmigración (fig. 5).

Como ejemplo cabe citar el caso de Hungría, donde se habla una lengua procendente de los montes Urales que fue impuesta en la Edad Media por los conquistadores Magiares. Sin embargo,

(9) A. Ammerman, *et al.*, *Man.*, *6*, 674, 1971.
(10) L. Cavalli, *et al.*, *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, *85*, 6002, 1988. L. Cavalli, *Investigación y Ciencia*, enero, 1992, p. 4-11.

la población húngara presenta un patrón genético europeo sin encontrarse prácticamente ningún resto genético de los que les otorgó su lengua.

El patrón de transmisión de lenguas y genes tiene un componente distinto. Así como los genes se transmiten exclusivamente de padres a hijos, en el caso de las lenguas puede ocurrir, además, entre individuos no emparentados. En las sociedades modernas el trasiego cultural adquiere una relevancia determinante, gran parte del mundo hace propios comportamientos que viajan en ondas de una parte a otra del mundo. Puedo dar fe de ello: vi un grupo de tailandeses bailando la rumba en una discoteca de Bangkok...

Cavalli-Sforza rechaza de un trazo la idea de razas y racismo. Nadie está en posición de demostrar una superioridad genética.[11] Los intentos de identificar el número de razas existentes están sujetos a importantes limitaciones. «*Cualquiera de ellas es, por lo tanto, arbitraria*», ya que los caracteres genéticos varían de forma gradual dentro de los mapas geográficos, y en pocos casos existen variaciones rápidas de más de un solo caracter genético. Un problema para los clasificadores de razas es la búsqueda de argumentos diferenciadores: «*A veces incluso simples confines linguísticos en ausencia de confines geográficos o políticos. En estos últimos casos es difícil decir si los confines genéticos son una consecuencia o una causa de aquellos liguísticos*», y concluye: «*la clasificación de razas es difícil, si no imposible*».

«*El grupo social al que pertenece el hombre juega un papel muy importante en la vida del individuo, y parece razonable que exista un impulso real a sentir y a actuar de forma acorde con el propio grupo, para obtener su apoyo y darlo si es necesario. El hecho de que sea razonable no significa que esta pulsión exista, y es difícil dar prueba de ello. Permitámonos, sin embargo, la hipótesis de que sea una pulsión real, es decir, una tendencia innata, a considerar al grupo al que pertenecemos como una entidad a la que llamaremos* «*nosotros*»*, definida en oposición al grupo al que no pertenecemos, que son*

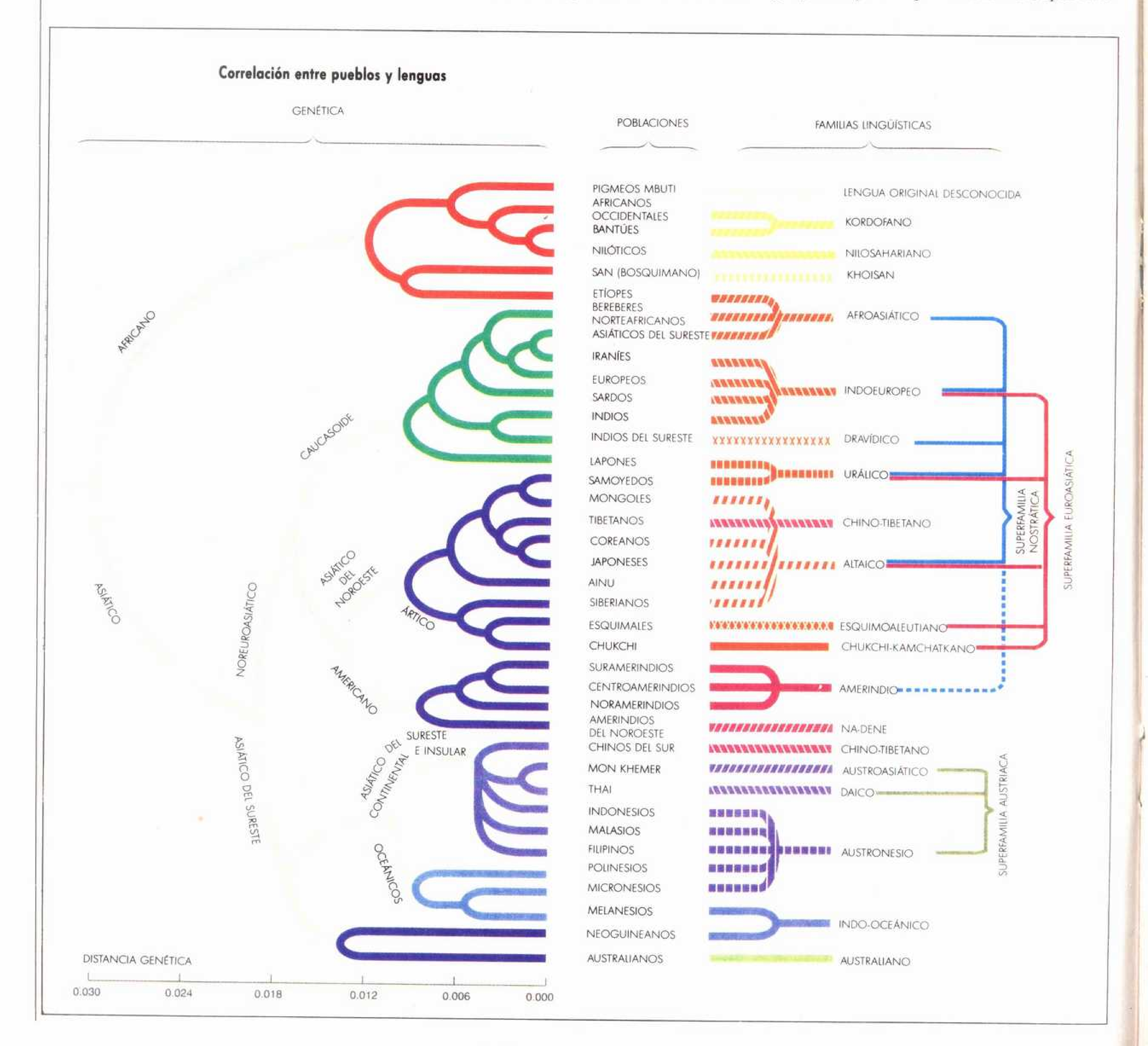


Figura 5. Correlación entre pueblos y lenguas. Fuente: Investigación y Ciencia, enero, 1992.

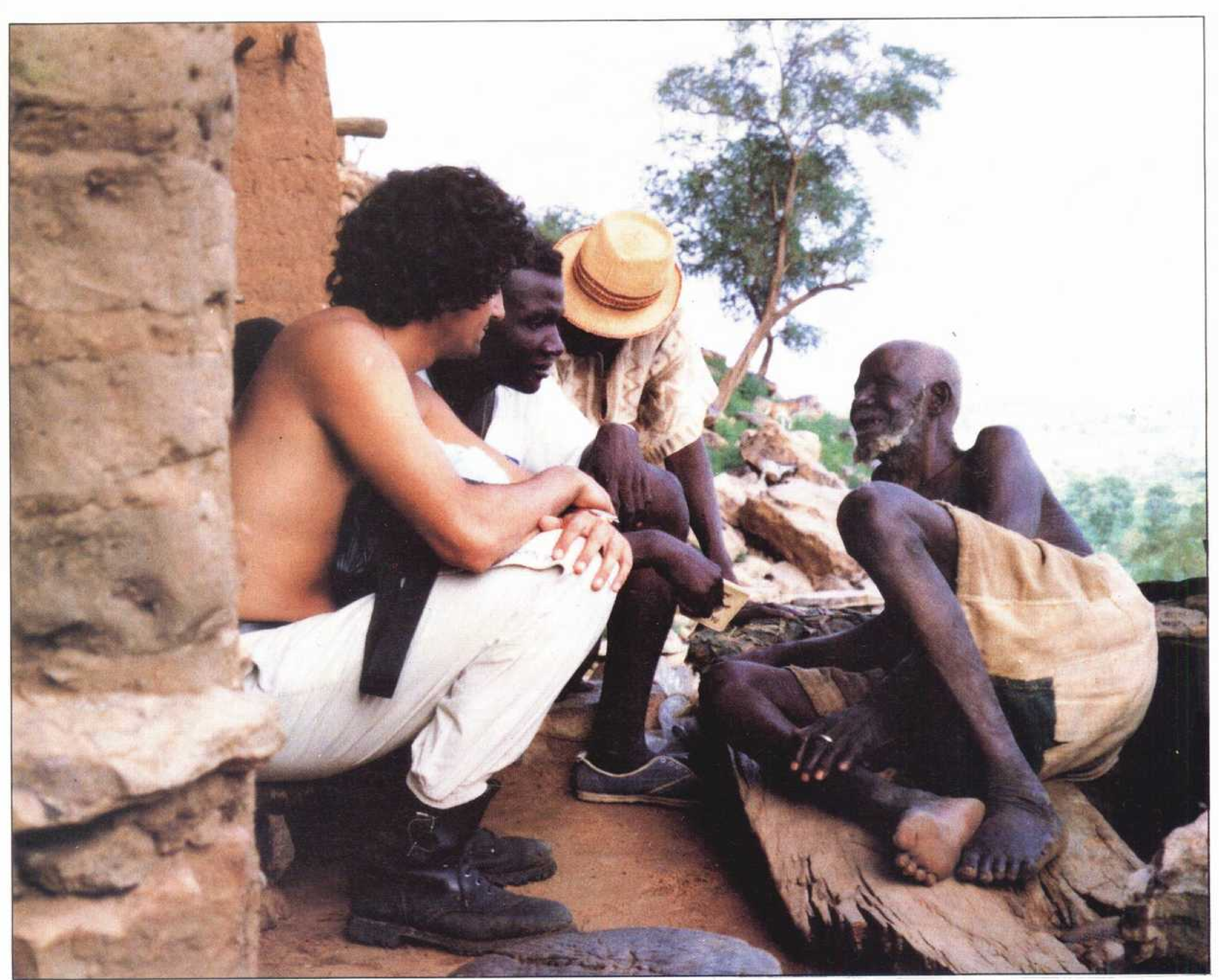


Figura 6. Los hombres de las tribus de cazadores-recolectores que todavía subsisten en el planeta, no debían tener una mala calidad de vida —de acuerdo con el antropólogo Claude Lévi-Strauss, —no es más rico el que más tiene, sino el que menos precisa»—. (Foto autor.)

los otros, 'ellos'. Si aceptamos esta hipótesis, deberíamos reconocer que la definición de «nosotros» varía según la circunstancia».

«Los celos y la envidia son a menudo causa de racismo, como lo es la excesiva valoración de la propia persona o del propio grupo, y el desprecio de los otros... En general la infelicidad, cualquiera que sea su motivo, puede determinar el deseo de rivalizar con un chivo espiatorio».

«Somos muy poco distintos... Las diferencias externas son particularmente visibles, y automáticamente pensamos que diferencias de la misma entidad existen igualmente por todo el resto de la constitución genética. Pero esto no es cierto, porque las diferencias del resto de la constitución genética son mucho mas pequeñas».

Estos fragmentos, extraídos del último trabajo de Cavalli- Sforza, *Chi siamo*, cuya lectura resulta gratificante y aleccionadora, resultan suficientes para rechazar de lleno ciertas hipótesis segregacionistas que se barajan en nuestros días, a veces de forma velada, otras descaradamente, dando lugar a problemas de convivencia en algunos casos y de guerras en otros.

Uno recomendaría la distribución gratuita de este libro por parte de los cascos azules entre las poblaciones de la antigua Yugoslavia, a sus líderes, a los que disparan, a los que tendrán que olvidar, a políticos del otro lado que utilizan de forma interesada la idea de pueblos o razas. En definitiva, a aquellos que han sido víctimas de ideas mal documentadas sobre este tema. Lamentablemente, a menudo las palabras de los científicos son desoídas.

El hombre avanza con paso decidido hacia un futuro que se avecina incierto, tendremos que aprender a convivir entre nosotros y con una tecnología que nos arrastrará no se sabe bien a dónde. De cualquier forma, es preciso contar con el hecho de que, a pesar del gran desarrollo alcanzado en los últimos tiempos, estamos todavía muy cercanos a nuestro pasado en contacto con la naturaleza. El hombre aprenderá más sobre el mundo, llegaremos a dominar tal vez los fenómenos que ocurren a muy pequeña escala o adquiriremos información sobre lugares muy alejados en el cosmos. El trabajo de Cavalli-Sforza nos indica que, vayamos donde vayamos, no debemos olvidar nuestro simple bagaje de cazadores-recolectores que nos acerca a la materia misma de nuestra existencia. ■

PARA MÁS INFORMACIÓN:

■ L.L. Cavalli-Sforza, W.F. Bodmer, *Genética de las poblaciones humanas*, Ediciones Omega, Barcelona, 1981.

■ Stephen Jay Gould, *La vida maravillosa*, Editorial Crítica, Barcelona, 1991.

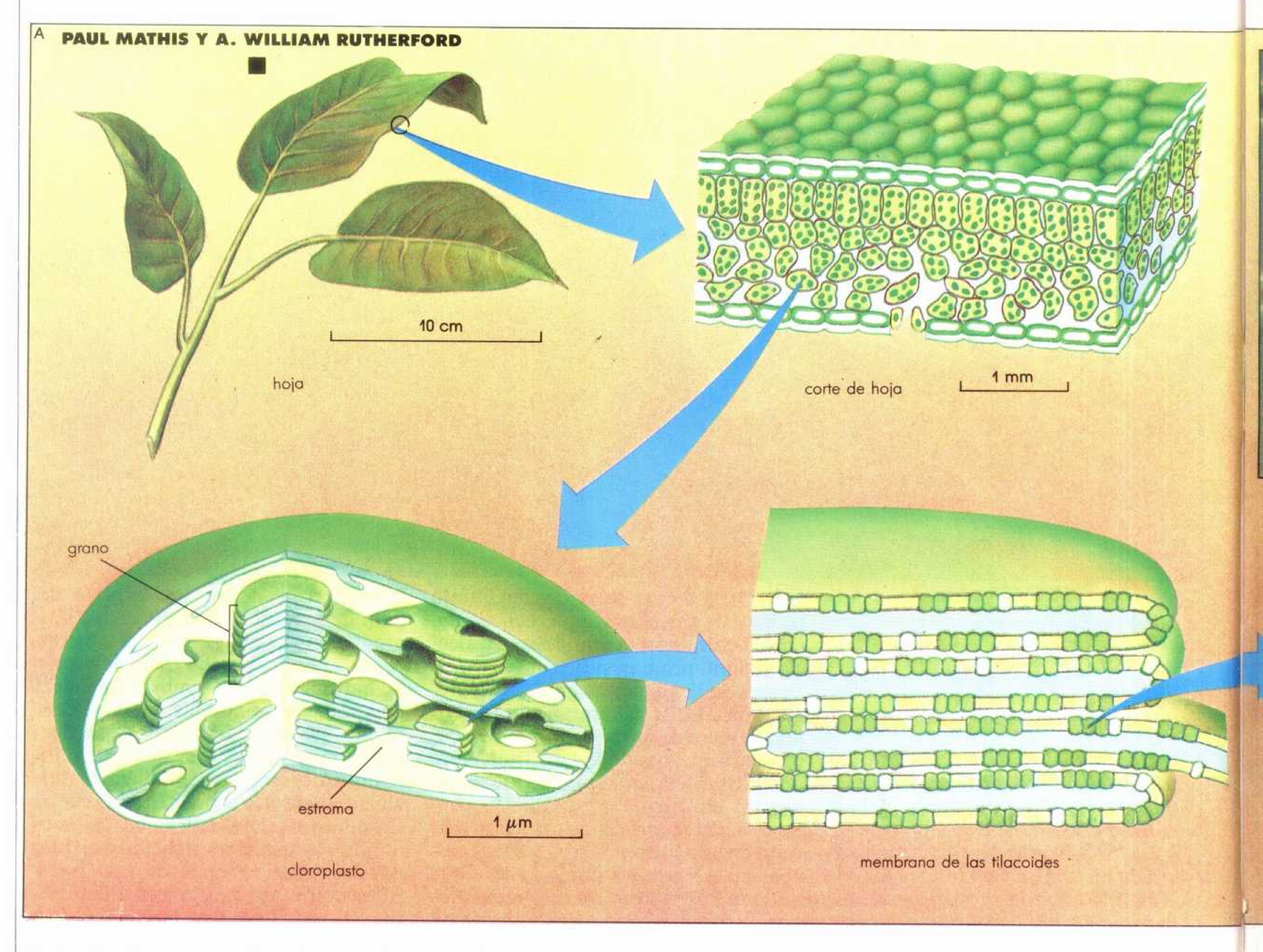
■ Mary Leakey, *Disclosing the past*, Doubleday, Nueva York, 1984.

■ Claude Lévi-Strauss, *Tristes trópicos*, Ediciones Paidós, Barcelona, 1992.

(11) G. Sorman, *En attendant les barbares*, Fayard, 1992, p. 161-167.

LA PRODUCCIÓN DE OXÍGENO EN LAS PLANTAS

PAUL MATHIS Y A. WILLIAM RUTHERFORD



Todas las plantas sintetizan la materia orgánica de que están constituidas mediante la fotosíntesis, la cual tiene lugar a partir del agua y del gas carbónico de la atmósfera, con la ayuda de un pigmento, la clorofila, y de la luz solar. Las microalgas y ciertas bacterias (bacterias púrpuras y verdes, cianobacterias) también son capaces de realizar esta función (fig. 1). En todas estas especies, excepto en las bacterias púrpuras y verdes, la fotosíntesis no forma solamente moléculas hidrocarbonadas, sino que también produce oxígeno, un «residuo» que es arrojado al medio de vida de los organismos. Gracias a este proceso, el mundo vegetal es el suministrador casi exclusivo de oxígeno a toda la Tierra. Las moléculas hidrocarbonadas producidas por la fotosíntesis son también la base de nuestra alimentación, de las materias textiles, de la madera y de la biomasa. Además, la fotosíntesis ha permitido la acumulación del carbón, del petróleo, del gas y de otros combustibles fósiles.

Con la esperanza de llegar algún día a dominarlos y activarlos, los investigadores intentan comprender los mecanismos de la conversión biológica de la energía luminosa del Sol —inextinguible y barata, pero inutilizable— en energía química. Ésta se acumula en el seno de enlaces muy energéticos establecidos entre los átomos que constituyen las moléculas hidrocarbonadas (véase

LOS VEGETALES VERDES POSEEN UN SISTEMA ENZIMÁTICO QUE LES PERMITE UTILIZAR LA LUZ SOLAR PARA, DURANTE LA FOTOSÍNTESIS, DESCOMPONER LAS MOLÉCULAS DE AGUA EN OXÍGENO, PROTONES Y ELECTRONES. SIN DUDA, ESTE SISTEMA EXTRAORDINARIO NO HA EVOLUCIONADO DESDE HACE TRES MIL MILLONES DE AÑOS. ESTÁ CONSTITUIDO POR UNA GRAN PROTEÍNA, EL CENTRO REACCIONAL PS2, GRACIAS A LA CUAL NO SE ACUMULAN EN ÉL NI EL OXÍGENO PRESENTE EN LA ATMÓSFERA NI EL GAS CARBÓNICO. ESTE NOTABLE CENTRO BIOQUÍMICO TIENE, PUES, UNA IMPORTANCIA FUNDAMENTAL PARA LA VIDA QUE SE DESARROLLA EN LA TIERRA.

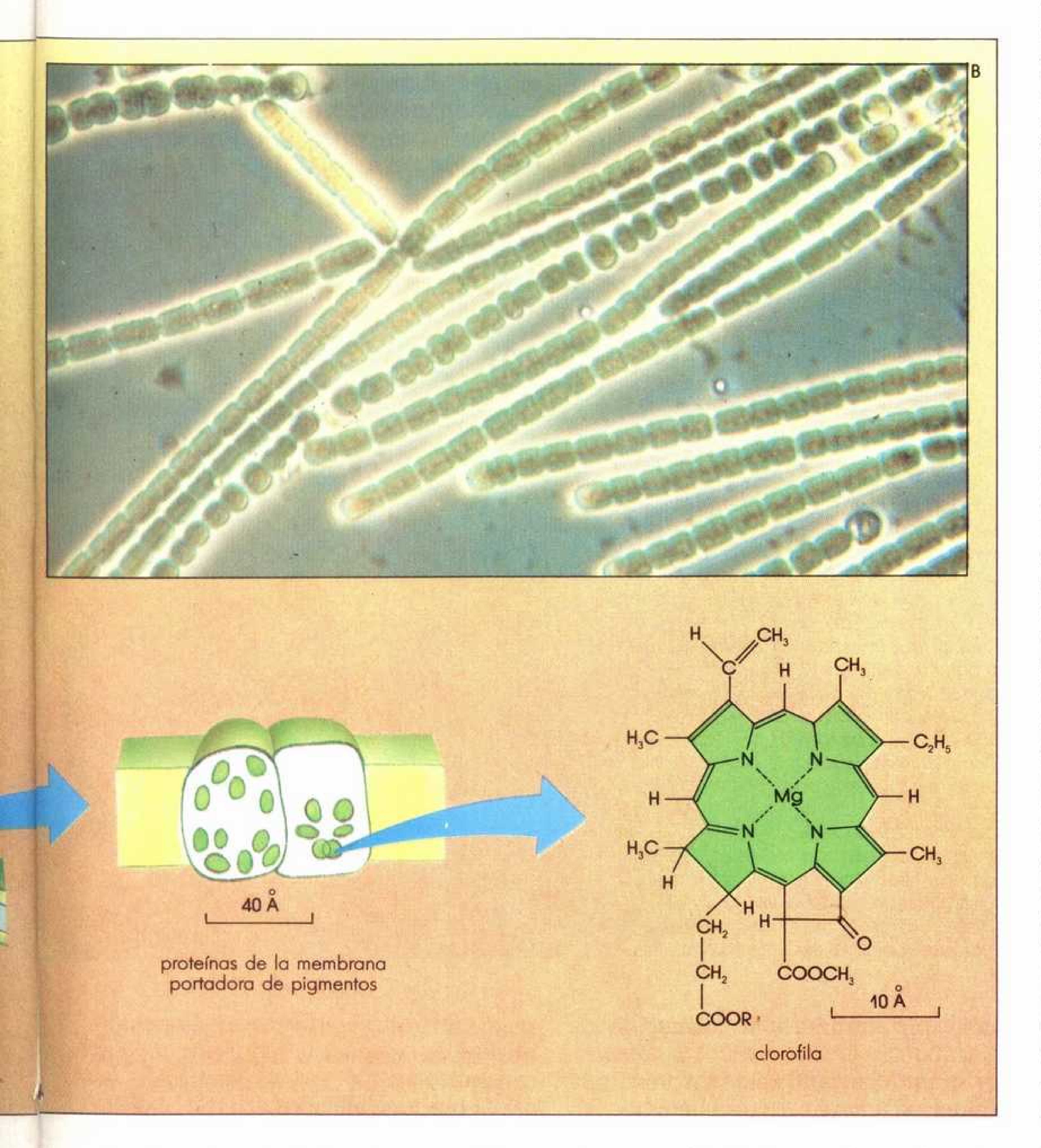


Figura 1. La fotosíntesis se realiza en la parte verde, o clorofiliana, de las plantas y de las algas. Es el origen del oxígeno de la atmósfera terrestre y de la formación de moléculas orgánicas a partir del gas carbónico. El corte de una hoja muestra la organización de las células, la mayor parte de las cuales contienen pequeños orgánulos que efectúan todas las reacciones de la fotosíntesis, los cloroplastos (A). Contienen empilamientos (o granums) de sacos alargados llamados tilacoides que bañan, en un medio poco estructurado, el estoma. En corte, la membrana de los tilacoides está formada por una bicapa lipídica portadora de numerosas proteínas. Algunas de ellas portan pigmentos que captan la luz, mientras que otras participan en las transferencias de electrones. Uno de los pigmentos, la clorofila, desempeña un papel fundamental absorbiendo la luz y desencadenando la transferencia de electrones, de la que depende la descomposición del agua y la formación de oxígeno. Este proceso lo realizan también desde hace tres mil millones de años unos organismos bastante más sencillos que las plantas: las cianobacterias (en B, Calothrix sp. vista por microscopio óptico). (Foto G. Guglielmi, Institut Pasteur.)

«Las fotosíntesis de las plantas», *Mundo Científico*, nº 37, junio, 1984 y «Bricolage genético y fotosíntesis», nº 129, *Mundo Científico*, noviembre, 1992). Otra perspectiva se basa en el hecho de que el agua está formada por oxígeno e hidrógeno y que los átomos de oxígeno que se desprenden en la fotosíntesis provienen exclusivamente de las moléculas de agua. Por esto, algunos científicos han creído que quizá sería posible, bajo el efecto de la luz visible y gracias a sistemas que imiten la fotosíntesis, descomponer el agua en oxígeno e hidrógeno. Este gas es un combustible de alto valor energético y *a priori* no contaminante. Se comprende, pues, todo el interés de esta reacción hipotética, dada la disponibilidad de agua y de luz.

Sin embargo, esto todavía no se ha logrado. La investigación sobre la fotosíntesis es aun muy fundamental. Intenta, sobre todo, penetrar en los misterios bioquímicos de la descomposición (o fotolisis) del agua y de la producción de oxígeno. Gracias a técnicas biofísicas cada vez más perfeccionadas (resonancia paramagnética, absorción de los rayos X, etc.), los conocimientos sobre este tema han experimentado grandes progresos en los últimos años.[1,2] Esto es de lo que trataremos en este artículo.

La fotosíntesis fue descubierta hace aproximadamente dos siglos. Cuatro bioquímicos vanguardistas en su época, el inglés Joseph Priestley (1772), el holandés Johannes Ingen-Housz (1779), los suizos Jean Senebier (1782) y Nicolas Théodore de Saussure (1804), así como el gran químico francés Antoine Laurent de Lavoisier (1777) demostraron que en la fotosíntesis intervienen cinco tipos de «objetos»: la parte verde de las plantas, la luz, el gas carbónico (CO_2), el agua (H_2O) y el oxígeno (O_2). En particular, una experiencia espectacular de Priestley demostraba que, sometidas a la luz, las plantas pueden «restaurar» el aire viciado, es decir, el aire cargado de CO_2 y pobre en oxígeno a causa de la combustión de una vela bajo una campana: en este medio cerrado, las plantas producen el oxígeno necesario para la respiración de un ratón.

Entre esta observación global de la producción de oxígeno gracias a la fotosíntesis y la comprensión —actualmente, todavía imperfecta— del mecanismo reaccional a escala molecular se ha recorrido un largo camino. A principios de este siglo, los investigadores todavía tenían una visión bastante simplista del proceso: un «complejo» formado por la clorofila, el gas carbónico y el agua se excitaba mediante luz, se reordenaba y, a continuación se disociaba produciendo oxígeno. A lo largo de los años

PAUL MATHIS,
ingeniero, agrónomo, dirige la sección de biogenética en la dirección de las Ciencias de la vida del CEA, en Saclay, Francia. Es presidente del Comité internacional de fotosíntesis y de la Sociedad francesa de fotobiología.
A. WILLIAM RUTHERFORD,
es director de investigación en el CNRS. Actualmente dirige el URA 1290 «Proteínas membranarias transductoras de energía», localizado en el centro CEA de Saclay.

veinte y treinta, los trabajos del biofísico francés René Wurmser y del microbiólogo holandés Cornelius van Niel esclarecieron dos puntos fundamentales. Wurmser apuntó la hipótesis de que en el proceso de fotosíntesis interviene una transferencia de electrones entre moléculas, es decir, se trata de un proceso de oxirreducción. Globalmente, una reacción de este tipo se caracteriza porque uno de sus reactivos se oxida, es decir, cede uno o varios electrones al otro reactivo que, a su vez, se «reduce». Basándose esencialmente en principios de la termodinámica, Wurmser propuso que, en una de las etapas de la reacción, el agua se descompone produciendo moléculas de oxígeno (O_2) bajo la acción de la luz. Esta reacción de fotolisis solamente puede desarrollarse si la molécula de agua pierde electrones: entonces es un «donante» de electrones, un reductor, que permite la formación de un compuesto reducido utilizado luego para la transformación, una reducción, del gas carbónico en glúcidos ricos en energía química, según un proceso que aquí no podemos describir. Wurmser concluía que la reacción de consumo del gas carbónico es espacial y temporalmente distinta de la reacción de la fotolisis del agua, que acaba en la formación de oxígeno.

Por su parte, a van Niel le sorprendió la analogía siguiente: ciertas bacterias, llamadas sulfurosas, son capaces de asimilar el CO_2 bajo la acción de la luz, pero a condición de disponer de un compuesto oxidable, es decir, susceptible de proporcionar electrones, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S). Ahora bien, este compuesto es análogo a la molécula de agua (H_2O), y el átomo de oxígeno es sustituido por un átomo de azufre. Van Niel propuso que todas las reacciones de fotosíntesis comportan una transferencia de hidrógeno desde un «donante» (como el agua o el sulfuro de hidrógeno) hasta un «receptor». Este receptor de hidrógeno, al reaccionar finalmente con el CO_2 produce moléculas hidrocarbonadas (CH_2O).

En realidad, a pesar de la analogía formal de las ecuaciones globales de la transformación del H_2S por las bacterias y del H_2O por las plantas, más tarde se descubrió que ambos procesos tienen mecanismos muy diferentes. Pero las proposiciones de Wurmser y de van Niel lograron un impacto considerable y, en 1937, el investigador británico Robert Hill confirmaba experimentalmente la exactitud de aquellas hipótesis. Probó, en especial, que la oxidación del agua y la reducción del gas carbónico se desarrollan independientemente en el tiempo y en el espacio celular. Formalmente, la ecuación de la fotosíntesis puede, por tanto, descomponerse en dos etapas: la oxidación del agua [$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+$ + 4 electrones] provoca el desprendimiento de oxígeno; la reducción del gas carbónico [CO_2 + 4 electrones + $4H^+$] produce glúcidos $(CHOH)_n$. Este proceso es exactamente inverso al de la respiración (véase el recuadro). ¿Dónde se desarrollan estas reacciones en las células vegetales? A partir de los trabajos de Julius von Sachs (1864) se sabe que su sede son unos orgánulos especializados, los cloroplastos (fig. 1). Con unas dimensiones de algunos micrómetros, contienen numerosas estructuras membranarias encerradas en unas vesículas llamadas tilacoides (del griego *thylakos*, saco). En su membrana se encuentra toda la maquinaria molecular que efec-

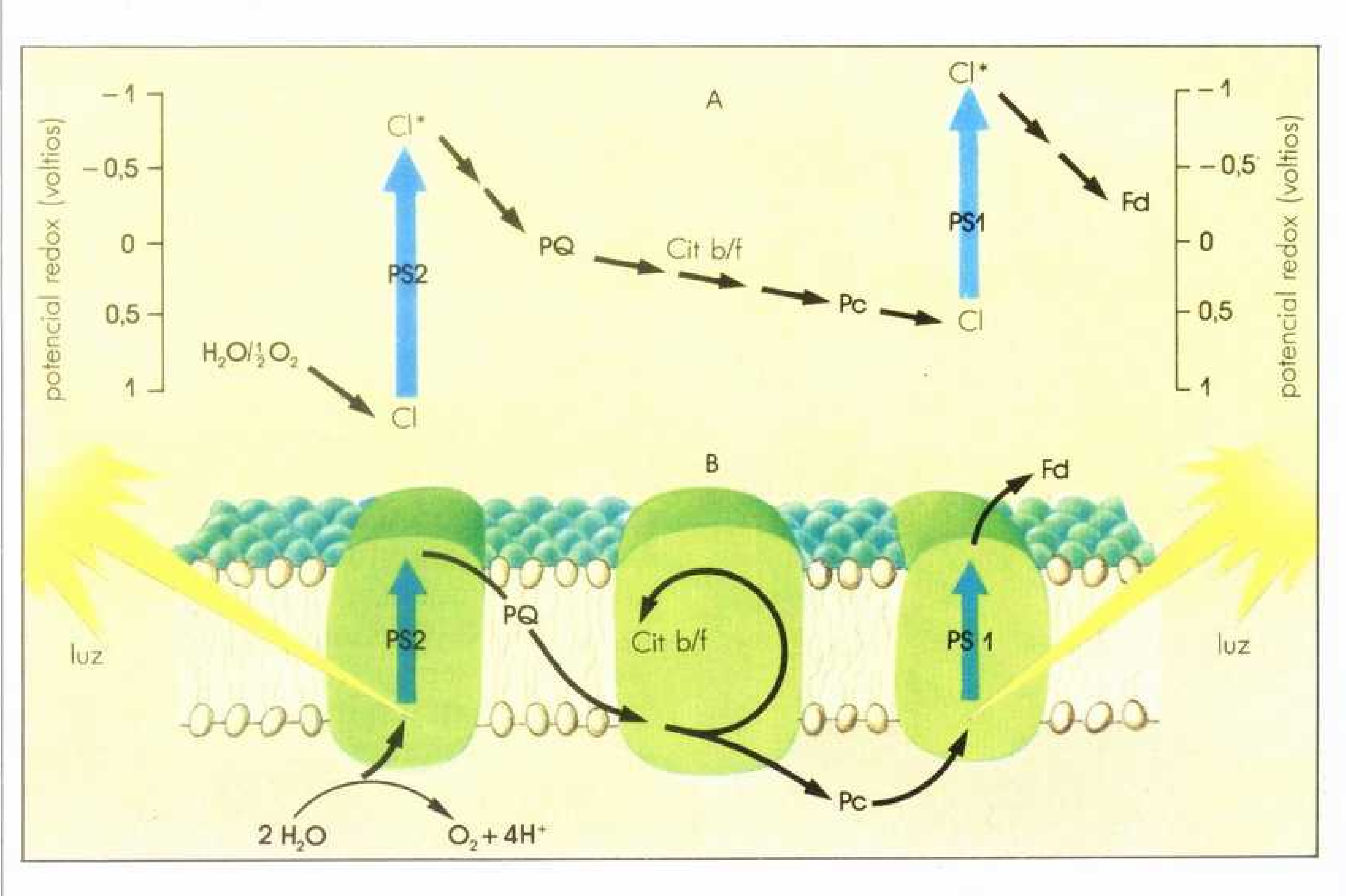
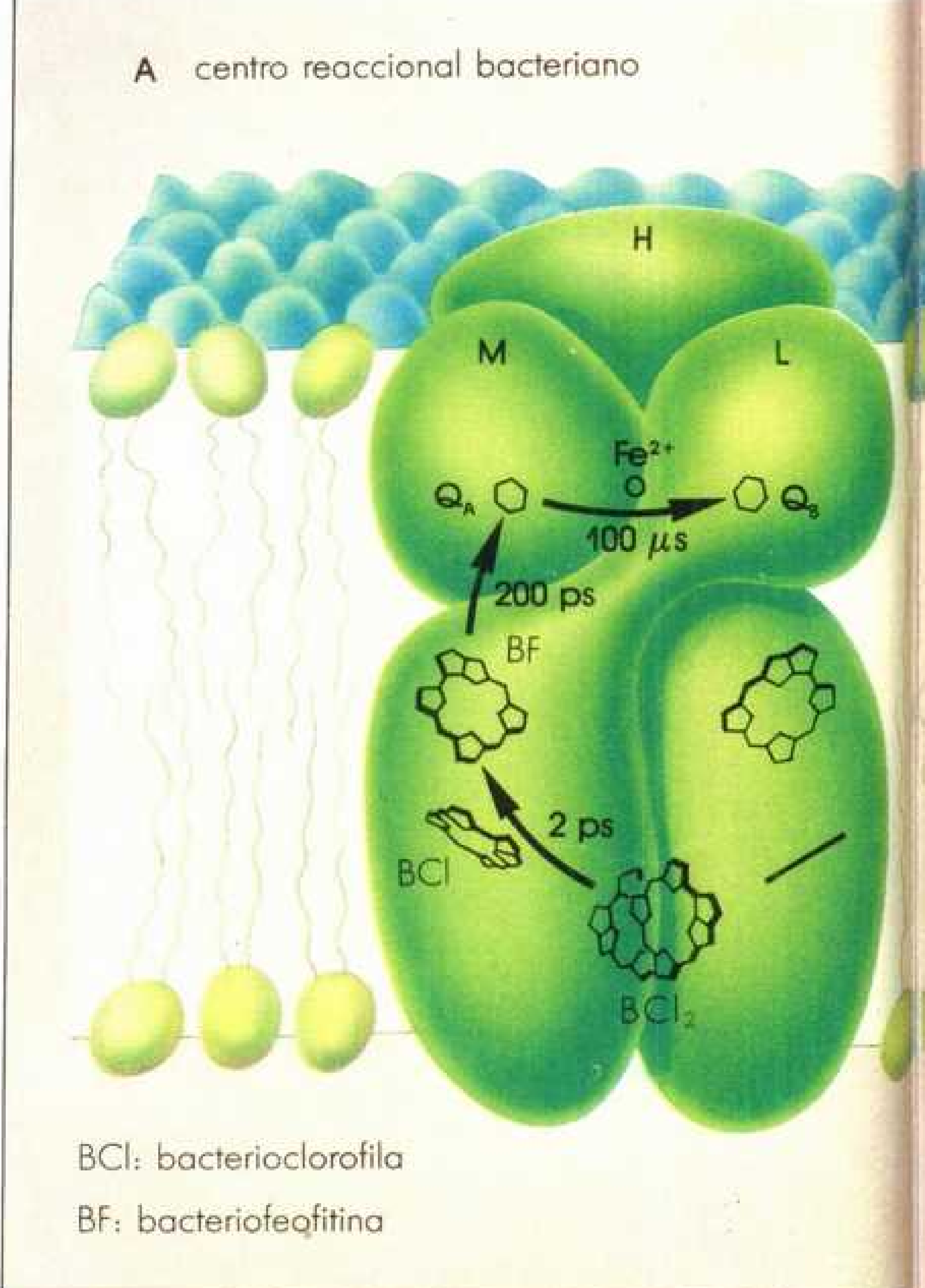


Figura 2. A lo largo de los años, los investigadores han entendido que el desprendimiento de oxígeno debido a los organismos fotosintéticos provenía de una larga serie de reacciones de transferencia de electrones, es decir, de una cadena de reacciones de oxirreducción en las que un compuesto se oxida si cede un electrón a otro compuesto, mientras que el que lo recibe se reduce. Los esquemas A (funcional) y B (estructural) ilustran uno de los descubrimientos fundamentales concernientes a este fenómeno: la intervención de dos tipos de complejos moleculares, los centros reaccionales, que pertenecen a fotosistemas. Estos centros pueden compararse a dos pilas de potenciales diferentes que funcionan en serie (A). La oxidación del agua ($2H_2 \rightarrow O_2 + 4H^+$ + 4 electrones) se desarrolla en el seno del centro reaccional (PS2) del fotosistema 2, a un potencial cercano a +0,81 V (B, a la izquierda). Los electrones liberados de esta manera sirven para la reducción del CO_2 en materia orgánica ($CO_2 + 4H^+$ + 4 electrones → H_2O + glúcidos), que necesita un potencial del orden de -0,32 V. Los electrones pasan espontáneamente de un potencial negativo a un potencial positivo. Para ir del agua al sistema de reducción del CO_2, hay que hacer intervenir dos pilas biológicas conectadas en serie, los centros reaccionales PS2 y PS1. Estas pilas producen electrones cuando sus clorofilas (cl) son excitadas (cl) por la luz solar. Las «conexiones eléctricas» están aseguradas por moléculas intermediarias oxirreductoras: plastoquinona (PQ), citocromo b/f y plastocianina (Pc). La ferrodoxina (Fd) asegura el acoplamiento de estas reacciones con la reducción del gas carbónico. De hecho, ésta necesita también la energía aportada por una molécula rica en energía, el ATP (adenosina trifosfato), que es sintetizada gracias al transporte de protones (H^+) acoplado al flujo de electrones. El esquema estructural (B) muestra que los tres grandes complejos proteicos (PS1, PS2 y citocromo b/f) están insertados en la membrana del tilacoide, mientras que las proteínas pequeñas (Pc y Fd) están situadas fuera de esta membrana.*



túa las primeras etapas de la fotosíntesis.

Hacia 1950 se probó definitivamente la intervención, durante la fotosíntesis, de dos conjuntos moleculares muy complejos llamados fotosistemas. Cada uno de ellos está constituido por pigmentos (clorofilas, carotenoides, etc.) y una proteína, el centro reaccional. Los pigmentos absorben la luz —forman la «antena colectora» del fotosistema—, mientras que el centro reaccional efectúa las primeras etapas de la conversión de la energía luminosa en energía química. Esquemáticamente, uno de los fotosistemas, el fotosistema 1, está asociado a la reducción del CO_2 que interviene en un segundo tiempo, mientras que el otro, el fotosistema 2, es responsable de la oxidación del agua (fig. 2). Ambos sólo funcionan mediante la energía luminosa.

El centro reaccional PS2 del fotosistema 2 efectúa la reacción de oxidación del el sistema es oxidante si su potencial es positivo, esto es, si tiene una gran avidez de electrones. No obstante, el potencial de oxirreducción que caracteriza la descomposición del agua en oxígeno y en protones es igual a +0,81 volt (a pH 7), mientras que el potencial de las reacciones que conducirán finalmente a la reducción del CO_2 está próximo a los −0,32 volt. Es imposible que los electrones, cargados negativamente, vayan de manera espontánea de un polo positivo (+0,82 V) a un polo negativo (−0,32 V). La transferencia de electrones del PS2 hacia el PS1 necesita, pues, una aportación exterior de energía: es a este nivel donde interviene la luz (fig. 2): es ella la que suministra la energía a los centros reaccionales y permite la transferencia de los electrones desde las moléculas de agua que los pierden hacia moléculas que las aceptan y reducen el gas carbó-

En cuanto a la estructura del PS2 todavía no ha podido determinarse. Se han obtenido cristales, pero son de dimensiones tan pequeñas que no han podido estudiarse por difracción de los rayos X, la única técnica capaz de aportar una imagen precisa de la estructura de una proteína membranaria. El análisis bioquímico demostró que el PS2 contiene unos diez polipéptidos, es decir, moléculas formadas por aminoácidos en un número comprendido entre algunas decenas y algunos centenares. Estos polipéptidos soportan moléculas de pigmentos y los grupos químicos que intervienen en las transferencias de electrones. Dos de ellos, llamados D1 y D2, presentan grandes analogías con los dos polipéptidos centrales del centro reaccional de *Rps. viridis*.

Por otra parte, los dos tipos de centros reaccionales contienen dos transporta-

Figura 3. La estructura propuesta para el centro reaccional PS2 de las plantas (B) se inspira en gran manera en la del centro reaccional de la bacteria púrpura Rhodopseudomonas viridis *(A). En efecto, numerosos argumentos experimentales sugieren que los dos centros reaccionales presentan fuertes analogías. Su parte central está formada por dos polipéptidos (L y M en la bacteria, D1 y D2 en el PS2) asociados entre sí en una estructura casi simétrica. Llevan las moléculas implicadas en la transferencia de electrones. Las quinonas Q_A y Q_B son simétricas con relación al ion ferroso (Fe^{2+}). El centro bacteriano comporta un polipéptido (H) ausente en el centro reaccional PS2 que, a su vez, comporta otros numerosos polipéptidos (los números en cursiva indican las masas moleculares de los polipéptidos en kilodaltons, kDa). En particular, tres proteínas extrínsecas (abajo), ausentes en el centro bacteriano, contribuyen a la estabilidad del edificio y al mantenimiento de los iones calcio y cloruro, cuya presencia es indispensable para el buen desarrollo del proceso de oxidación del agua. Ésta tiene lugar al nivel del emplazamiento catalítico de manganeso (Mn_4), cuya estructura es muy controvertida. La función del citocromo b_{559} todavía es desconocida. Se ha indicado el orden de magnitud de algunas etapas de transferencia de electrones.*

agua: aquí, los electrones son arrancados a las moléculas de agua, lo que provoca la producción de oxígeno. Los electrones son cedidos al centro reaccional PS2, que los utiliza, a su vez, para reducir una pequeña proteína, la ferredoxina. Esta última es la que proporciona los electrones necesarios para la reducción del gas carbónico. Como estas partículas están cargadas negativamente, cualquier sistema de intercambio de electrones se caracteriza por un potencial eléctrico, el potencial de oxirreducción (o potencial redox). Cuanto más negativo es el potencial de un sistema, más tendencia tiene a dar electrones (es más reductor). Y, a la inversa, nico. Buena parte de nuestros conocimientos actuales sobre la estructura del centro reaccional PS2, responsable de la fotolisis del agua, proviene de la comparación con el centro reaccional de la bacteria púrpura *Rhodopseudomonas viridis*. Este complejo molecular fue cristalizado en 1983 por Hartmut Michel en el Instituto Max Planck de Martinsried, cerca de Munich. Posteriormente, el estudio de estos cristales por difracción de los rayos X, realizado en colaboración con Johann Deisenhofer y Robert Huber, hizo que Michel determinara la estructura del centro reaccional con una resolución de 2,5 Å (premio Nobel de química 1988)[3] (fig. 3A).

dores de electrones, las quinonas Q_A y Q_B, unidas a los polipéptidos centrales, es decir D1 y D2 en el caso del PS2. En ambos tipos de centros reaccionales, la quinona Q_B es desplazada del emplazamiento proteico donde normalmente se fija (en D1) por unos inhibidores de síntesis, las triazinas. Además, éstas se han utilizado en gran escala como desherbantes, ya que interrumpen la transferencia de electrones y la fotosíntesis. Según algunos bioquímicos, la inhibición de dos sistemas mediante moléculas idénticas constituye una clara indicación en favor de su analogía estructural y funcional. Conociendo la estructura del centro reaccional de las bacterias púr-

(1) A.W. Rutherford *et al.*, in J. Barber (ed.), *The photosystems: structure, function and molecular biology*, Elsevier Science Publ., 1992.
(2) R.C. Debus, *Biochim. Biophys. Acta*, *1102*, 269, 1992.
(3) J. Deisenhofer *et al.*, *Nature*, *318*, 618, 1985.
(4) H. Michel y J. Deisenhofer, *Biochemistry*, *27*, 1, 1988.
(5) P. Mathis y A.W. Rutherford *in* J. Amesz (ed.), *Photosynthesis*, Elsevier Science Publ., 1987.

pura, una serie de analogías permite diseñar un modelo aproximado de la estructura del PS2 (fig. 3B).[4,5]

¿Cómo funciona este centro reaccional? ¿Cómo convierte la energía luminosa en energía electroquímica? La respuesta a esta cuestión ha exigido la utilización de numerosos métodos espectroscópicos, especialmente la espectroscopia de absorción por destellos: los centros reaccionales son excitados por un destello breve frente a las reacciones estudiadas, que se siguen gracias a un haz de luz analítica. En efecto, las moléculas no tienen el mismo espectro de absorción cuando son oxidadas que cuando son reducidas; por tanto, absorben la luz de modo diferente, lo que permite observar su oxidación o su reducción. Actualmente, gracias a la disponibilidad de las fuentes láser «femtosegundo», es posible estudiar reacciones de la brevedad de una diezmilésima de milmillonésima de segundo (10^{-13} s) (véase también «Los seísmos moleculares de la hemoglobina», *Mundo Científico*, n° 137, julio-agosto, 1993). En el centro CEA de Saclay, utilizamos esta técnica para estudiar muchas reacciones con una resolución de 10^{-9} s (una milmillonésima de segundo).

Cada partícula de luz elemental (fotón) absorbida por el fotosistema 2 excita una molécula de clorofila de la antena colectora. Entonces, la energía de excitación se transfiere rápidamente de una molécula de clorofila a la más próxima, hasta un complejo formado probablemente por dos moléculas de clorofila, llamado «donante primario de electrón» o P-680 (P de pigmento y 680 por la longitud de onda de absorción máxima), perteneciente al centro reaccional PS2. En las bacterias fotosintéticas, el donante primario de electrón está constituido por un par de moléculas de bacterioclorofila; en el PS2, su estructura es todavía objeto de controversias. De todos modos, una vez excitado, el P-680 transfiere en algunos picosegundos (10^{-12}) un electrón a una molécula de feofitina —una clorofila sin magnesio—, con lo que adquiere una carga positiva (catión $P\text{-}680^+$), tal como demostró en 1967 el grupo de Horst Witt de la universidad de Berlín. [6]

A continuación, el electrón pasa de la feofitina a la quinona Q_A (en aproximadamente 200 picosegundos) y luego, mucho más lentamente, en 200 microsegundos (10^{-6}s), a la quinona Q_B (fig. 3). Seguidamente es transferido a un complejo de citocromos llamado «complejo b_6-f». y a continuación a una pequeña proteína con cobre, la plastocianina, antes de llegar al centro reaccional PS1.

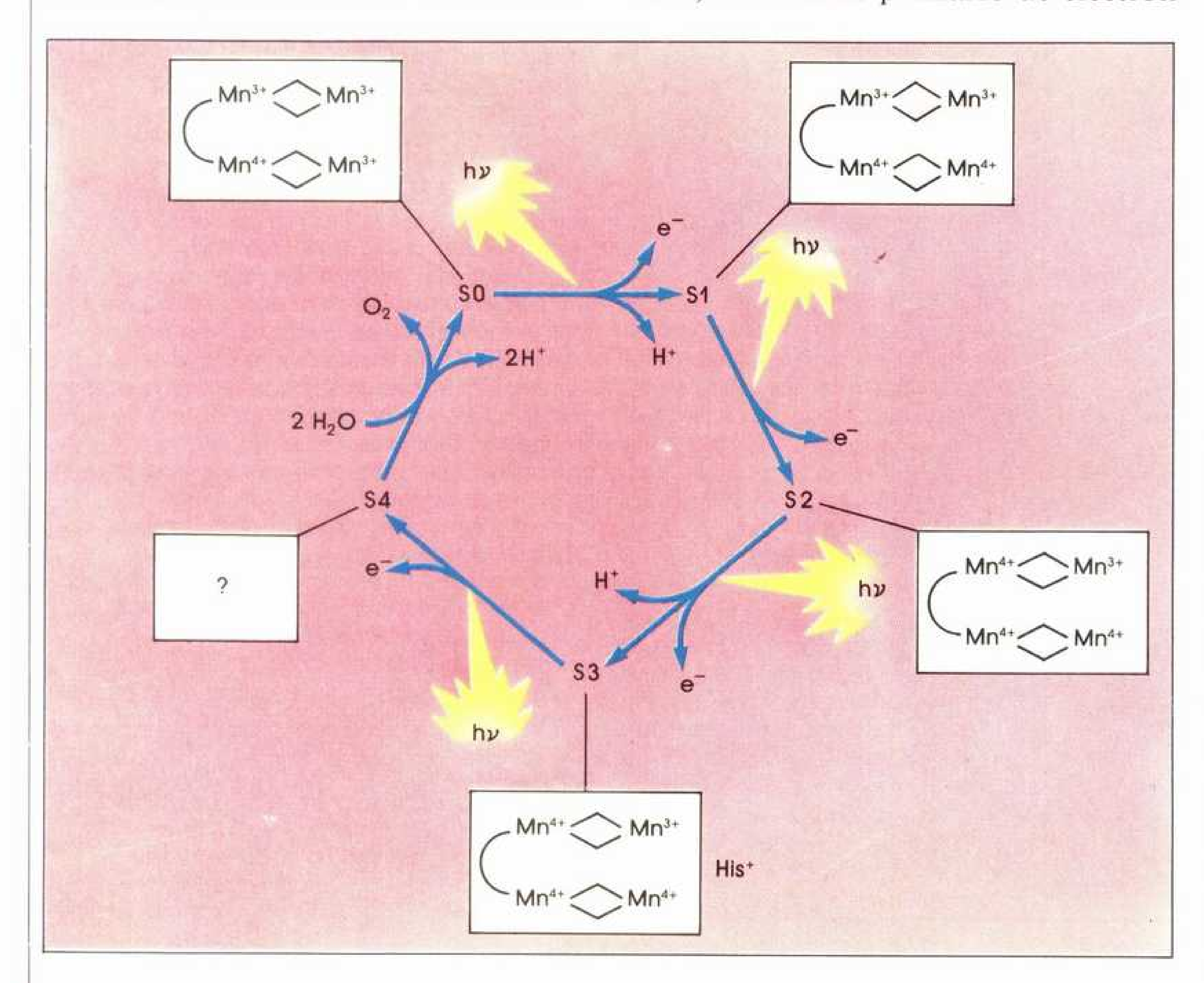


Figura 4. La medida de la cantidad de oxígeno liberada por cloroplastos iluminados por una serie de destellos muy breves y muy intensos, indica que el sistema responsable de la oxidación del agua pasa por cinco estados de oxidación creciente (indicados de S0 a S4). Las cuatro primeras etapas necesitan la acción de un fotón (hν) y comportan la pérdida de un electrón. Esta figura trata de reconstituir la evolución del emplazamiento durante los diferentes estados S. En el curso de las tres etapas se liberan protones (H+) y las moléculas de agua sólo intervienen en la etapa final. En todos los estados, los cuatro átomos de manganeso situadas en el centro reaccional PS2 estarían presentes bajo formas de dos dímeros. Entre el estado S0 y el estado S1, un átomo de manganeso cambia de estado de oxidación, pasando de la forma Mn (III) a la forma Mn (IV), más oxidada. Además, durante el paso del estado S1 al S2, el grado de oxidación de uno de los átomos de manganeso aumenta de Mn (III) a Mn (IV). Durante la transición de S2 a S3, el manganeso no cambiaría de grado de oxidación; esto implica que se oxidaría otra cosa; probablemente se trata de un ácido aminado, la histidina.
Sin embargo, este resultado es contestado por T. Ono, de la «Photon Factory» de Tsukuba, Japón. La naturaleza del estado S3 es, pues, una cuestión muy abierta. Este modelo es hipotético desde otros puntos de vista. Además, la naturaleza de S4 es totalmente desconocida y el ciclo de liberación de los protones es más complejo del que se ha representado aquí.

COMO LA ESTRUCTURA DEL CENTRO REACCIONAL PS2 ES DESCONOCIDA, SE INTENTA UNA APROXIMACIÓN GRACIAS A LA MODELIZACIÓN QUÍMICA

■

Por su parte, el P-680 oxidado ($P\text{-}680^+$) recupera un electrón cedido por una molécula intermedia TyrZ. Ésta, al oxidarse ($TyrZ^+$), puede oxidar un complejo de cuatro iones manganeso llevado por las proteínas centrales del PS2 y que, a su vez, efectúa finalmente la oxidación del agua. El conjunto de estas reacciones dura algunos milisegundos. A cada fotón absorbido por el fotosistema corresponde un electrón transferido sobre las quinonas y, por tanto, un «agujero», es decir, un déficit de un electrón —una carga positiva— que participa en la reacción de oxidación del agua. Por tanto, el complejo clorofílico P-680 constituye el núcleo fotoquímico del centro reaccional PS2.

TyrZ, la molécula que cede un electrón al complejo clorofílico P-680 oxidado tiene un papel primordial en la transferencia de electrones. Se trata de uno de los aminoácidos del polipéptido D1, una tirosina. Su identificación se consiguió gracias a la conjunción de los resultados de una técnica espectroscópica y una técnica de biología fina. La primera es la resonancia paramagnética electrónica (RPE), parecida a la resonancia magnética nuclear (RMN). Permite utilizar la estructura molecular de las moléculas «paramagnéticas», que contienen electrones no empareja-

dos. Esta situación se observa en algunos iones metálicos y en los radicales, es decir, las moléculas que han ganado (radical-anión) o perdido (radical-catión) un electrón. La segunda técnica, la mutagénesis dirigida, permite cambiar muy exactamente cualquiera de los aminoácidos de una proteína modificando el gen correspondiente (véase «Los premios Nobel 1993», *Mundo Científico*, nº 143, febrero, 1994).

¿De qué modo estas técnicas han llevado a la identificación de la molécula TyrZ? En la universidad de Berkeley, Gerald Babcock y Kenneth Sauer demostraron en los años 1970 que el PS2 posee dos moléculas orgánicas, llamadas D y Z, cuyo espectro en estado oxidado (D^+ y Z^+) es idéntico. Sin embargo, el radical Z^+ tiene una duración de vida más corta que D^+, que es perfectamente estable. En 1987, Bridgette Barry y Babcock, de la universidad de Michigan,(7) observaron que el marcaje específico de las tirosinas con deuterio provoca una modificación del espectro RPE de D^+. Como D y Z poseen los mismos espectros, dedujeron que ambos son tirosinas. Además, al constatar que D y Z existen en todas las especies vegetales en las que se ha determinado la secuencia de aminoácidos de D1 y D2, y contando con la similitud de las estructuras de la parte central de PS2 y del centro reaccional bacteriano, Richard Debus, de la universidad de Michigan, y Wim Vermaas, de la universidad de Arizona, han apuntado la hipótesis de que estas tirosinas están situadas en un emplazamiento propicio desde el punto de vista reaccional, la posición nº 160, cerca del extremo de D1 y de D2 situado en la parte interna de la membrana de las tilacoides. Esta hipótesis fue confirmada en 1988 por estos mismos laboratorios, gracias a la mutagénesis dirigida:(8,9) sustituyendo la tirosina 160 por otros aminoácidos, las propiedades manifestadas por D^+ o Z^+ desaparecen. Por consiguiente, D y Z son tirosinas (llamadas TyrD y TyrZ). Pero, actualmente, tan sólo se conoce la función de TyrZ.

Tal como hemos visto, el encadenamiento de las reacciones fotoquímicas a partir de P-680 permite la formación de un óxido potente, $TyrZ^+$. Sin embargo, la oxidación del agua requiere la extracción de cuatro electrones para la formación de una molécula de oxígeno (O_2), mientras que el PS2 proporciona las cargas positivas una por una, separando una carga eléctrica por fotón absorbido. En realidad, para comprender el mecanismo de la reacción, es necesario relacionar la producción de oxígeno con el consumo de los electrones. En este punto concreto, las experiencias efectuadas en 1969 por Pierre Joliot y sus colaboradores en el Instituto de biología fisicoquímica de París han propiciado un importante progreso conceptual. Se dejan algunos minutos algas o cloroplastos en la oscuridad; luego, se iluminan mediante destellos muy intensos, de manera que todos los centros reaccionales PS2 queden excitados. Sin embargo, cada destello es suficientemente breve (10 microsegundos o menos) para que únicamente excite una sola vez cada centro.(10) Se constata entonces que la producción de oxígeno es casi nula después de los dos primeros destellos, alcanza un

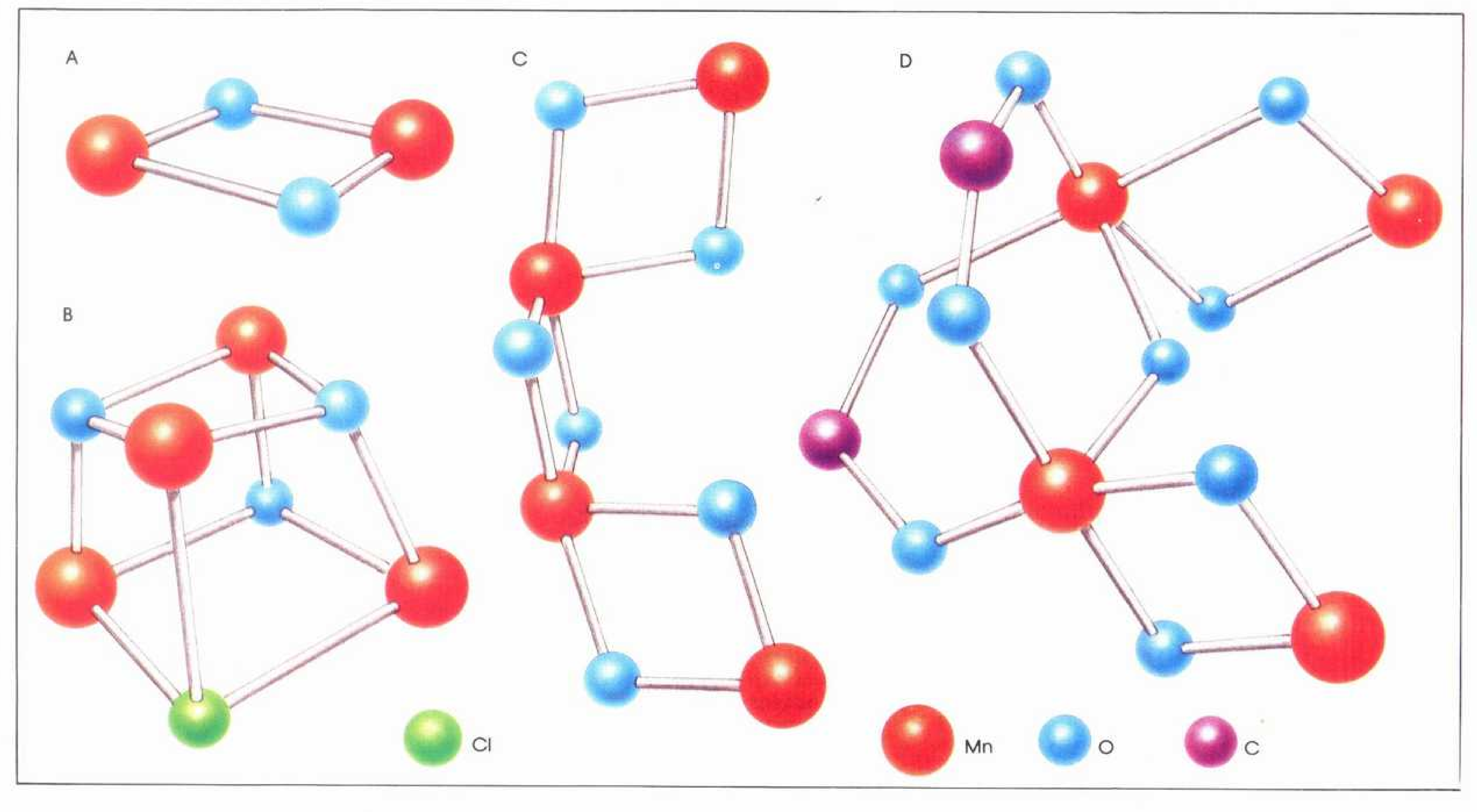
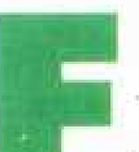


Figura 5. Para intentar dilucidar la estructura del emplazamiento catalítico con manganeso del centro reaccional PS2, en el que se efectúa la oxidación del agua, los químicos han recurrido a la modelización química: sintetizan sistemas simples que contienen átomos de manganeso dispuestos de un manera tan próxima como es posible a la que está postulada en el sistema natural. En esta figura sólo se indican los enlaces entre los átomos de manganeso (cada uno de estos últimos tiene seis enlaces). Estos átomos están en el estado de oxidación Mn (III) y Mn (IV), que son detectados por espectroscopia en el sistema natural. También se caracterizan por la presencia de puentes μ-oxo, es decir, por enlaces establecidos entre un átomo de oxígeno (en azul) y dos átomos de manganeso (en anaranjado).
El dímero «histórico» estudiado por Stephen Cooper y Melvin Calvin, en Berkeley en 1977, se presenta en (A). El modelo (B) representa otra etapa importante de la modelización; se trata de una estructura cúbica distorsionada producida en 1987 por George Christou y sus colegas en la universidad de Indiana. El modelo C, sintetizado en 1992 por el equipo de Jean-Jacques Girerd en la universidad de Orsay, muestra propiedades espectroscópicas cercanas a las del centro reaccional PS2. Finalmente, el modelo D es una estructura hipotética basada en los resultados de la absorción de rayos X. La comparación de las propiedades espectroscópicas permite, por aproximaciones sucesivas, afinarlas cada vez más. (De las referencias 16, 17 y 18.)

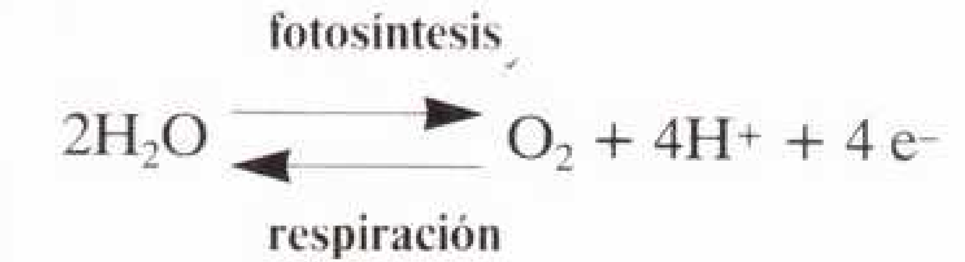
(6) G. Döring *et al.*, *Z. Naturforsch.*, 226, 639, 1967.
(7) B. Barry y G.T. Babcock, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 84, 7099, 1987.
(8) R.C. Debus *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 85, 427, 1988.
(9) W.F.J. Vermaas *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 85, 8477, 1988.
(10) P. Joliot *et al.*, *Photochem. Photobiol.*, 10, 309, 1969.

máximo después del tercero y, a continuación, presenta un comportamiento oscilante de periodo cuatro durante la iluminación con los destellos siguientes —es decir, el máximo se alcanza cada cuatro destellos—. En 1970, Bessel Kok, de los laboratorios Martin Marietta, de Baltimore, propuso una interpretación muy sencilla de estos resultados: [11] el ciclo de la oxidación del agua comportaría cinco estados S, (del inglés *state*, estado), indicados de S0 a S4, y correspondientes a cinco formas transitorias, cada vez más oxidadas, del PS2. El retorno del estado S4, el más oxidado (el menos rico en electrones) al estado S0 iría acompañado de la producción de oxígeno (fig. 4). Pero ¿cómo identificar la naturaleza química de los estados S?
Un experimento clave en esta identificación fue el que hicieron, en 1980, Charles Dismukes e Iona Siderer, de la universidad de Princeton, gracias al estudio del espectro RPE de los cloroplastos a muy baja temperatura, cercana a la del helio líquido.[12] Estos investigadores constataron la aparición, después del primero y quinto destellos —es decir, en el estado S2, ya que el estado S1 es el estado más estable en la oscuridad (se reforma lentamente a partir de S0)— de un espectro particular, llamado espectro multilínea, cuyo comportamiento es característico de ciertos metales de transición. Para esta señal, el manganeso es el candidato ideal. En efecto, algunos análisis clínicos han demostrado que el PS2 funcional tiene cuatro átomos de manganeso unidos a la estructura proteica. Su extracción mediante tratamientos químicos bastante suaves (pH superior a 9, adición de aminas o de agentes reductores) provoca la desaparición de la capacidad del PS2 para oxidar el agua. Tal como demostró en 1960 el equipo de W.L. Butler, de San Diego, esta capacidad puede restablecerse con la adición al medio de manganeso en condiciones controladas.[13]
Además, el manganeso es un metal susceptible de presentar numerosos estados de oxidación, es decir, que puede ceder de dos a siete electrones a otros compuestos. Varios de estos estados son altamente oxidantes (propicios a captar electrones), lo que hace del manganeso un candidato ideal para efectuar la oxidación del agua. El examen de la estructura del espectro RPE de S2 indica la participación de varios átomos de manganeso que se encuentran en estados de oxidación diferentes.
A pesar de que la RPE ha proporcionado información sobre la naturaleza del estado S2, ha sido la espectroscopia de absorción de los rayos X,[14,15] especialmente con los trabajos del equipo de Melvin Klein en el sincrotón de Stanford, la que ha permitido conocer mejor la evolución del sistema en el transcurso de los otros estados S (fig. 4).
Para precisar la configuración química de los átomos de manganeso en los diferentes estados S, los investigadores recurren actualmente a un proceso que muchas veces se muestra fructífero: la modelización (fig. 5). Este método consiste en sintetizar moléculas o grupos de moléculas, unos modelos simples que se acercan todo lo posible a la estructura hipotética postulada para el sistema estudiado. La comparación de las propiedades de este «modelo» con las propiedades del objeto real permite estimar hasta qué punto el modelo difiere del sistema natural y, así, afinar la estructura propuesta para éste. Algunos de los modelos sintetizados[16,18] tienen muchas propiedades en común con el emplazamiento manganeso del PS2, pero ninguno puede reproducir las propiedades funcionales de dicho emplazamiento.
Por otra parte, se ha observado que los estados S dependen no sólo de la oxidación del manganeso, sino también de la presencia de los iones calcio y cloruro. En nuestro laboratorio de bioenergética del centro CEA de Saclay, nos interesamos especialmente por la función de estos iones, los cuales pueden disociarse del centro reaccional; esto permite estudiar los efectos de este tratamiento tanto mediante RPE como midiendo el oxígeno desprendido. Con ello, Alain Boussac ha establecido claramente que la ausencia de los iones calcio o iones cloruro inhibe la transición de S3 a S0.[19,29] Además, durante estos trabajos, y en colaboración con Jerôme Lavergne, del Instituto de biología fisicoquímica de París, en 1991 se demostró que la transición del estado S2 al S3 va acompañado de la oxidación de un aminoácido del PS2, una histidina (perteneciente probablemente a D1).[21] Este fenómeno es digno de mencionarse, ya que se trata del único caso conocido en biología de oxidación de una histidina.
Actualmente prosiguen las investigaciones sobre las funciones complementa-



Fotosíntesis y respiración

Un científico imaginativo podría representar la vida sobre la Tierra como un combate sin fin entre cloroplastos y mitocondrias. En efecto, estos dos tipos de orgánulos celulares trabajan en sentido inverso: los cloroplastos sintetizan moléculas hidrocarbonadas, mientras que las mitocondrias las degradan. Desde el punto de vista de la oxirreducción, también trabajan en sentido inverso: los primeros, durante la fotosíntesis, descomponen el agua y producen oxígeno, mientras que los segundos, durante la respiración, realizan un proceso opuesto, como lo muestran las ecuaciones globales que se indican a continuación:



$$2H_2O \rightleftharpoons O_2 + 4H^+ + 4\,e^-$$

Estas dos reacciones se desarrollan en grandes proteínas membranarias, el centro reaccional PS2 del cloroplasto y la citocroma oxidasa de la mitocondria. Ambas comportan una sucesión de cuatro etapas que implican un electrón cada una. Pero los centros de oxirreducción son de una naturaleza química diferente.
En el PS2 se encuentran los iones manganeso, la tirosina, clorofilas *a*, una feofitina, así como plastoquinonas.
En la citocromo oxidasa, se trata de dos iones de cobre y de dos agrupamientos (hemos) de hierro, los electrones son aportados por el citocromo *c*, que los toma en la cadena respiratoria.[27] La reducción a cuatro electrones del oxígeno molecular da lugar a cuatro estados intermedios del enzima, contrapartidas de los cuatro estados S de la oxidación, bastante estables, del PS2. Sin embargo, hay una diferencia fundamental: fuertes evidencias indican que se produce una reducción parcial del oxígeno en tres de los cuatro estados intermedios de la citocroma oxidasa, mientras que, en el PS2, el agua no sufre ninguna oxidación parcial antes de que se hayan acumulado cuatro oxidantes equivalentes, es decir, antes del fin del ciclo de oxidación del manganeso. Debido a esto, es mucho más fácil estudiar el mecanismo de acción catalítica de la citocromo oxidasa que la del PS2. Además, las dos proteínas difieren netamente en sus mecanismos transferencia de protones (H^+. La citocromo oxidasa parece ser una auténtica bomba de protones: durante un ciclo reaccional, cuatro H^+ son consumidos por la síntesis de dos moléculas de agua y otros cuatro protones son transportados desde el exterior al interior de la membrana mitocondrial (servirán para la síntesis de una molécula energética, el ATP). El PS2 genera también un gradiente de protones a través de la membrana de los tilacoides, pero lo hace debido a la disposición asimétrica de sus transportadores de electrones: en el interior del tilacoide se liberan protones debido a la oxidación del agua, y otros protones son captados en el exterior de la membrana durante la reducción de la quinona Q_B.
De esta manera se ve que la simetría de las ecuaciones globales de oxidación del agua y de reducción del oxígeno corresponde a sistemas enzimáticos extremadamente diferentes. Sin embargo, los mitocondrias y los cloroplastos comparten una función esencial que no se describe en este artículo: la de sintetizar, a partir de ADP (adenosina difosfato) y de fosfato, utilizando el gradiente transmembranario de protones, el ATP (adenosina trifosfato), que sirve de vector celular de energía.

rias de los iones cloruro y calcio. La principal hipótesis atribuye a estos iones el papel de pantalla: protegerían el centro manganeso, muy reactivo, del acceso demasiado precoz (es decir, antes de que se acumulen cuatro cargas positivas) de moléculas de agua, lo que podría provocar la formación de peróxido de hidrógeno (agua oxigenada, H_2O_2), tóxico para la célula, y de manganeso Mn (II) inestable, que desestabilizaría el PS2. Por otra parte, estos iones podrían tener efectos de «compensación de carga» durante el ciclo de los estados S.[1,2,22]

LA OXIDACIÓN DE DOS MOLÉCULAS DE AGUA PROVOCA LA LIBERACIÓN DE UNA DE OXÍGENO Y DE CUATRO PROTONES

■

A pesar de los progresos conseguidos en el conocimiento del emplazamiento catalítico de manganeso del PS2, la cuestión más difícil es ésta: ¿cómo es posible que la oxidación de dos moléculas de agua provoque la liberación de una molécula de oxígeno y de cuatro protones? Las leyes de la fisicoquímica clásica referente a las reacciones de oxidorreducción nos permiten pensar en varios esquemas reaccionales. Por ejemplo, es posible que la oxidación se desarrolle en cuatro etapas, en cada una de las cuales interviene un electrón. Sin embargo, los datos de la termodinámica demuestran que estas reacciones implican unos valores de potenciales de oxidorreducción incompatibles con las capacidades oxidantes del PS2. Además, los análisis espectroscópicos presentados más arriba demuestran que es el manganeso el que es oxidado etapa a etapa (o una histidina en el estado S3), y no el agua. Estas observaciones permiten suponer que la oxidación del agua se hace químicamente en una sola etapa, una reacción «concertada» de cuatro electrones. Desafortunadamente, esta reacción es muy difícil de analizar, ya que tiene lugar con una extraordinaria rapidez: cuando el PS2 se encuentra en el estado S3 y recibe un destello, la liberación del oxígeno, medida mediante un electrodo de respuesta rápida, se efectúa en algunos milisegundos, por lo que todavía no ha podido descubrirse ningún intermediario reaccional, ni aun a baja temperatura, en la cual las especies son, en general, más estables.

Muchos laboratorios han utilizado agua marcada con isótopos estables del oxígeno (^{17}O o ^{18}O) para intentar descubrir este mecanismo. Ya en 1940, en Berkeley, Samuel Ruben y sus colegas efectuaron unos experimentos «históricos»: empleando agua marcada con ^{18}O y la detección por espectroscopia de masa, demostraron que el oxígeno fotosintético proviene, efectivamente, del agua.[23] Más recientemente, Richard Radmer y Otto Ollinger, de los laboratorios Martin Marietta (Baltimore), utilizaron una excitación por destellos acoplada a la espectroscopia de masa y demostraron que, hasta el estado S3 inclusive, el agua no es modificada químicamente por el PS2,[24] lo que concuerda con la hipótesis de una reacción de oxidación concertada que se desarrolla solamente a partir del estado S4.

Sin embargo, si la oxidación del agua se efectúa en una sola etapa, los cuatro protones resultantes deberían ser liberados de una sola vez, simultáneamente con la molécula de oxígeno. Pero no es así. La liberación de protones puede seguirse midiendo finamente la acidificación del medio durante una excitación del PS2 por un tren de destellos. Estas mediciones indican que los protones son liberados progresivamente (fig. 4). Un reciente trabajo de Fabrice Rappaport y Jérôme Lavergne ha demostrado que el número de protones liberados por centro PS2 no es exactamente un número entero.[25] Por este motivo, la mayor parte de los investigadores piensan que los protones liberados no provienen directamente de la disociación del agua, sino de grupos ácido-básicos susceptibles de intercambiar protones y constituidos por ciertos aminoácidos próximos al complejo manganeso. Por tanto, los protones liberados por oxidación del agua pasan al medio, pero según un proceso complejo en el que intervienen muchos aminoácidos.

A pesar de los progresos recientes, el estado de nuestros conocimientos sobre la reacción de fotolisis del agua en la fotosíntesis puede, a fin de cuentas, parecer decepcionante; sin embargo, no debe olvidarse que el problema es de una complejidad extrema. Hay varias pistas que parecen prometedoras e invitan a continuar avanzando. La más ambiciosa consiste en cristalizar el PS2, como ya se ha hecho con el centro reaccional de varias bacterias. Esto permitiría determinar su estructura por difracción de rayos X, lo que constituiría una base sólida para comprender el mecanismo de su funcionamiento. Los progresos son muy lentos, sin duda porque el PS2 es relativamente lábil y, por tanto, inhomogéneo. En cuanto al centro reaccional PS1, fue cristalizado en 1993 por el grupo de Horst Witt, de Berlín,[26] y hay verdaderas esperanzas de obtener dentro de algunos años la estructura tridimensional a escala atómica. Cuando se disponga de esta misma información para el PS2, las técnicas espectroscópicas podrán utilizarse con mucha más eficacia para resolver los problemas de estructura local y de mecanismo.

Por otra parte, estas técnicas avanzan constantemente. Son unos instrumentos insustituibles, especialmente para la determinación de la naturaleza de los átomos directamente enlazados al manganeso. Por ejemplo, la fuente europea de radiación sincrotón (ESRF), de Grenoble, permitirá grandes progresos en la espectroscopia de absorción de los rayos X. De igual modo, nuestro laboratorio ha intervenido recientemente en la utilización de dos técnicas de resonancia paramagnética electrónica que parecen ser muy prometedoras: la RPE pulsada y, en una colaboración entre Sun Un, de Saclay, y Louis-Claude Brunel, del laboratorio de campos magnéticos intensos de Grenoble, la RPE de campo muy alto. Finalmente, la modelización química, es decir, la síntesis de construcciones artificiales que reproducen lo mejor posible las propiedades del complejo natural, es otra pista extremadamente interesante, mientras que la mutagénesis dirigida es una fuente constante de avances en el conocimiento de las proteínas.

En lo que respecta a las perspectivas de aplicación de estas investigaciones, hay que reconocer que no existe ningún proyecto preciso. La orientación más plausible es, a nuestro entender, el conocimiento de las propiedades catalíticas del manganeso y de sus complejos «multinucleares», de los cuales los químicos sintetizan estructuras variadas. Por otra parte, lo mismo que en todos los grandes problemas de investigación fundamental, uno de los intereses esenciales del estudio de la oxidación del agua en las plantas es estimular la imaginación, incitar a los avances metodológicos y ofrecer conceptos utilizables en otros muchos sectores de la química y de la biología. ■

PARA MÁS INFORMACIÓN:

- ■ J. Barbier (ed.) *The photosystems: structure, function and molecular biology*, Elsevier Science Publishers, 1992.
- ■ D. Walker, *Energy, plants and man*, Oxygraphics Limited, Brighton, 2ª ed., 1992.
- ■ L. Stryer, «La photosythèse», *in La Biochimie de Lubert Stryer*, Médecine-Sciences/Flammarion, 3ªed., 1992, p. 517.
- ■ Para una bibliografía más completa véase la página 293.

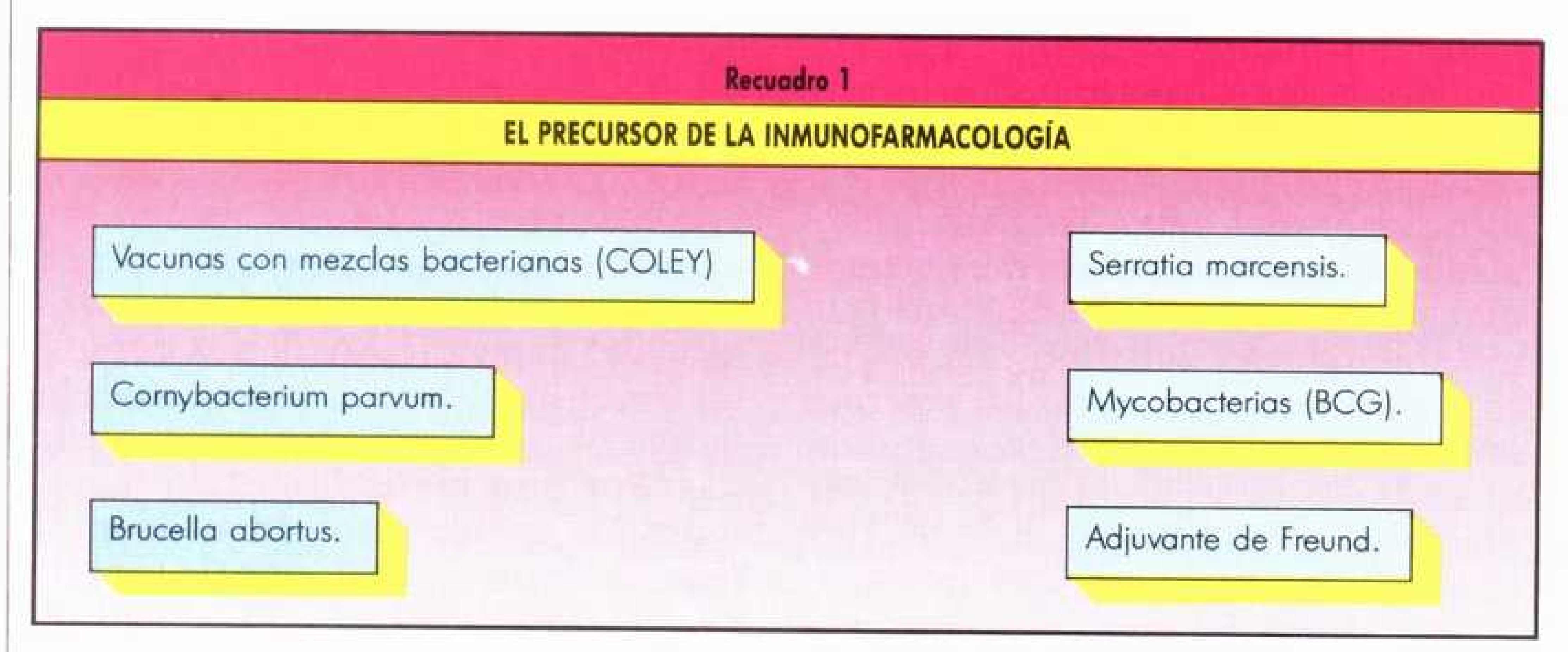
(11) B. Kok *et al., Photochem. Photobiol., 11*, 457, 1970.
(12) G.C. Dismukes e Y. Siderer, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 78*, 274, 1981.
(13) T. Yamashita y W.L. Butler *Plant. Physiol., 43* , 1978, 1968.
(14) V.K. Yachandra *et al., Science, 260*, 675, 1993.
(15) T.A. Ono *et al., Science, 258*, 1335, 1992.
(16) S.R. Cooper y M. Calvin, *J. Amer. Chem. Soc., 99*, 6623, 1977.
(17) G. Christou y J.B. Vincent, *Biochim. Biophys. Acta, 895*, 259, 1987.
(18) G. Philouze *et al., Angew. Chemie Int. Ed., 32* , 1629, 1993.
(19) A. Boussac *et al., Biochim. Biophys. Acta, 808* , 225, 1985.
(20) A. Boussac y A.W. Rutherford, *Biochemistry, 27*, 3476, 1988.
(21) A. Boussac *et al., Nature, 347*, 303, 1990.
(22) A.W. Rutherford, *TIBS, 14*, 227, 1989.
(23) S. Ruben *et al., J. Amer. Chem. Soc., 63*, 877, 1941.
(24) R. Radmer y O. Ollinger, *FEBS Lett., 195*, 285, 1986.
(25) F. Rappaport y J. Lavergne, *Biochemistry, 30*, 10004, 1991.
(26) N. Krauss *et al., Nature, 361*, 326, 1993.
(27) G.T. Babcock y M. Wikström, *Nature, 356*, 301, 1992.

GLICOBIOLOGÍA: UN
LA ESPECIALIZACIÓN

LAS CORRIENTES ACTUALES ENCAMINADAS AL APROVECHAMIENTO DEL POTENCIAL DE LOS SERES VIVOS PARA LA OBTENCIÓN DE NUEVOS PRODUCTOS O PARA LA MEJORA DE PROCESOS HAN ENCONTRADO EN LOS GLÚCIDOS O HIDRATOS DE CARBONO UNA NUEVA FUENTE DE INSPIRACIÓN. ESTA ORIENTACIÓN BUSCA SUS BASES DISCIPLINARES EN LA GLICOBIOLOGÍA QUE SACA PROVECHO DE LA POTENCIALIDAD FUNCIONAL DE LOS HIDRATOS DE CARBONO A TRAVÉS DE SU PAPEL EN LAS INTERACCIONES ENTRE (GLUCO)PROTEÍNAS, O ENTRE PROTEÍNA Y CÉLULA O ENTRE CÉLULA Y CÉLULA. COMO FRUTO DE ESTE POTENCIAL SE HAN ABIERTO NUEVAS VÍAS EN LA INMUNOFARMACOLOGÍA DANDO ORIGEN A UN SUBCAMPO AL QUE SE PUEDE REFERIR COMO GLUCOFARMACOLOGÍA. EL DESARROLLO DE LA GLICOBIOLOGÍA Y SU REPERCUSIÓN EN LA FARMACOLOGÍA PERMITE REFLEXIONAR SOBRE LA FORMA DE PROMOVER LA OBTENCIÓN DE PRODUCTOS NATURALES POR LA VÍA DE LA ETNOFARMACOLOGÍA EN LA QUE LA IDENTIFICACIÓN DE NICHOS CULTURALES PUEDE FAVORECER LA RACIONALIZACIÓN Y LA OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE NUEVOS FÁRMACOS

JUAN PABLO PIVEL Y EMILIO MUÑOZ

■



Recuadro 2

MODIFICADORES DE LA RESPUESTA BIOLÓGICA (ENTIDADES MOLECULARES)

- Endotoxina bacteriana (LPS).
- Muramil dipéptido (unidad básica del peptidoglucano componente mayoritario de la pared de bacterias).
- Polisacárido de pared de levaduras.
- Dimicolato de trhalosa («Cord Factors»).

La creciente influencia de la biología en el concierto científico y socioeconómico ha corrido en paralelo con la progresiva identificación de los códigos de información que preside la organización de los seres vivos. Este proceso ha girado principalmente alrededor del concepto de herencia, en particular en lo que concierne a las bases moleculares implicadas en el complejo proceso que traduce la información genética en los rasgos fenotípicos. Esta visión genético-céntrica de la biología ha conducido, en primer lugar, al desarrollo de la biología molecular y, subsiguientemente, a la proyección de estos avances en lo que se llama «nueva biotecnología», es decir, sacar partido del potencial de manipulación genética de los organismos para optimizar su utilización en la obtención de productos o bienes o en la mejora de servicios. No podemos olvidar, sin embargo, que existe la vieja biotecnología que desde los albores de la civilización humana ha permitido sacar provecho económico y social del enorme potencial de los seres vivos para la producción de alimentos y medicinas por medio de los clásicos procesos de fermentación. Tampoco se puede dejar de lado a otras importantes componentes de los seres vivos, los hidratos de carbono, que encierran un importante potencial de ac-

N CAMINO HACIA N EN BIOTECNOLOGÍA

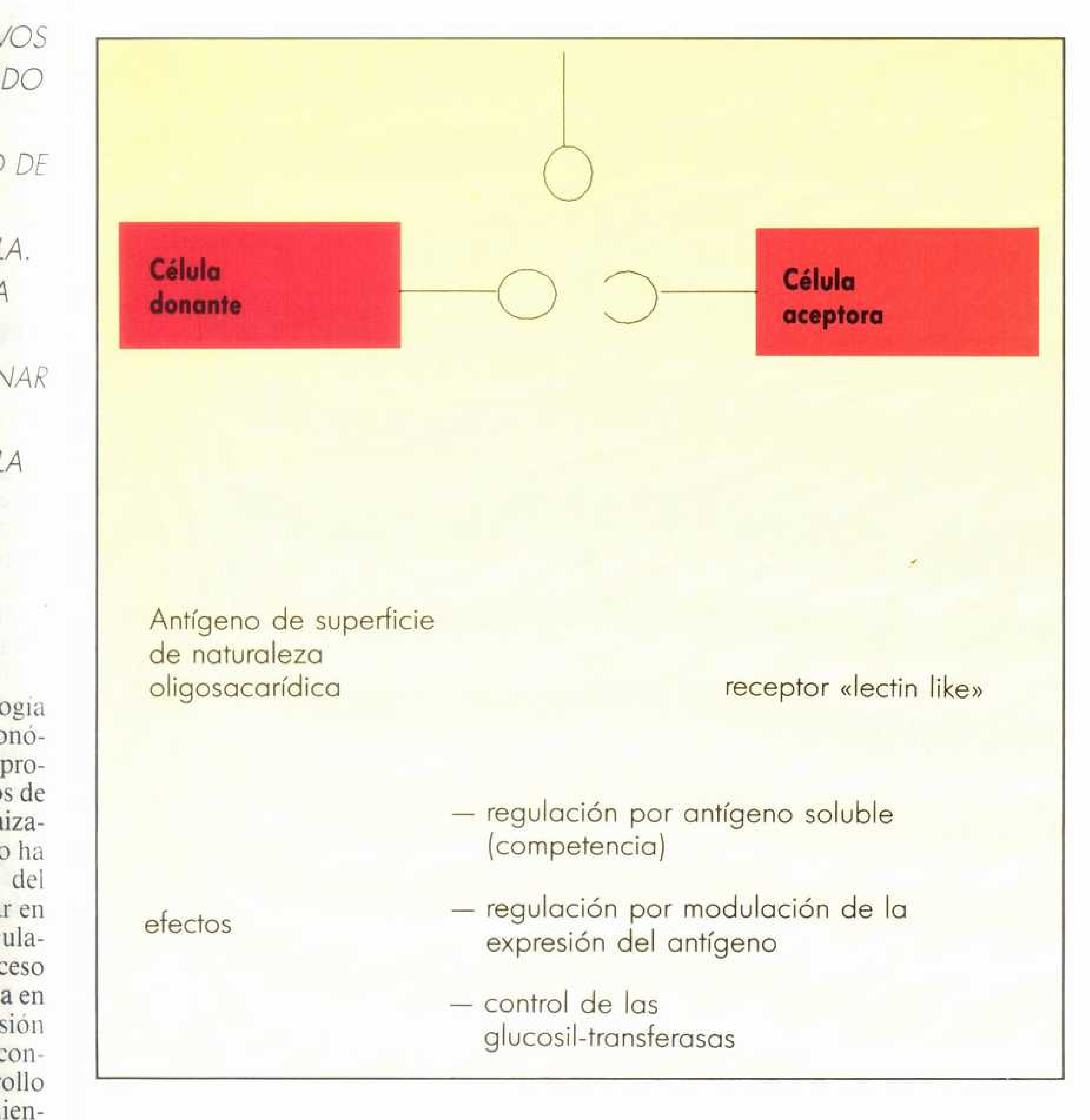


Figura 1. Esquema de actuación de los glucoproductos en relación con los procesos de reconocimiento celular.

tividad biológica y un notable caudal de información. Los hidratos de carbono comprenden monosacáridos (azúcares simples como la glucosa, la manosa y la fructosa) y oligosacáridos y polisacáridos, compuestos por monosacáridos enlazados. Los monosacáridos presentan distintas posibilidades de unión entre sí. Dos monosacáridos idénticos dan lugar a 10 disacáridos diferentes, mientras que aminoácidos idénticos solo producen un dipéptido. Cuatro nucleótidos diferentes originarán 24 tetranucleótidos, mientras que cuatro monosácaridos diferentes podrían configurar hasta 35 000 tetrasácaridos. Los hidratos de carbono incorporan, por tanto, más información por unidad de peso que otras moléculas.

La biología y la bioquímica de los hidratos de carbono, a pesar de su gran número y variabilidad en la naturaleza han concitado una pequeña fracción de los esfuerzos y el interés de los bioquímicos y biólogos, o incluso de los químicos durante los años en que ha tenido lugar el sugerente desarrollo de la aproximación reduccionista al fenómeno de la vida. El enfoque principal se dirigía hacia las fascinantes áreas de los ácidos nucleicos y de sus productos primarios, las proteínas.

Los hidratos de carbono se consideraban fundamentalmente como moléculas responsables, por un lado, de estructuras celulares y, por otro, como reservorios de energía. La Enciclopedia Británica en su importante análisis de los componentes bioquímicos de los organismos establece que «los hidratos de carbono sirven a los organismos como fuentes de energía y como constituyentes estructurales esenciales» aunque en el citado texto se hace una importante mención a que los ácidos nucleicos, la base de la información genética, contienen hidratos de carbono, el residuo ribosa de los nucleótidos, como parte de su estructura.

Se precisa así el reconocimientos de la presencia ubicua de los glucoconjugados en el mundo biológico, aunque su exacta función y papel permaneciera en una evidente oscuridad. Sin embargo, progresivamente se iba acumulando evidencia que permitía establecer que los hidratos de carbono estaban implicados de manera esencial en complicados procesos de reconocimiento. Aflora la idea de que los hidratos de carbono desempeñan un papel central en la «actividad social» de las células, a través de las membranas celulares, y de las macromoléculas (hormonas, receptores, factores inmunológicos) lo que determina su evidente potencial farmacológico.

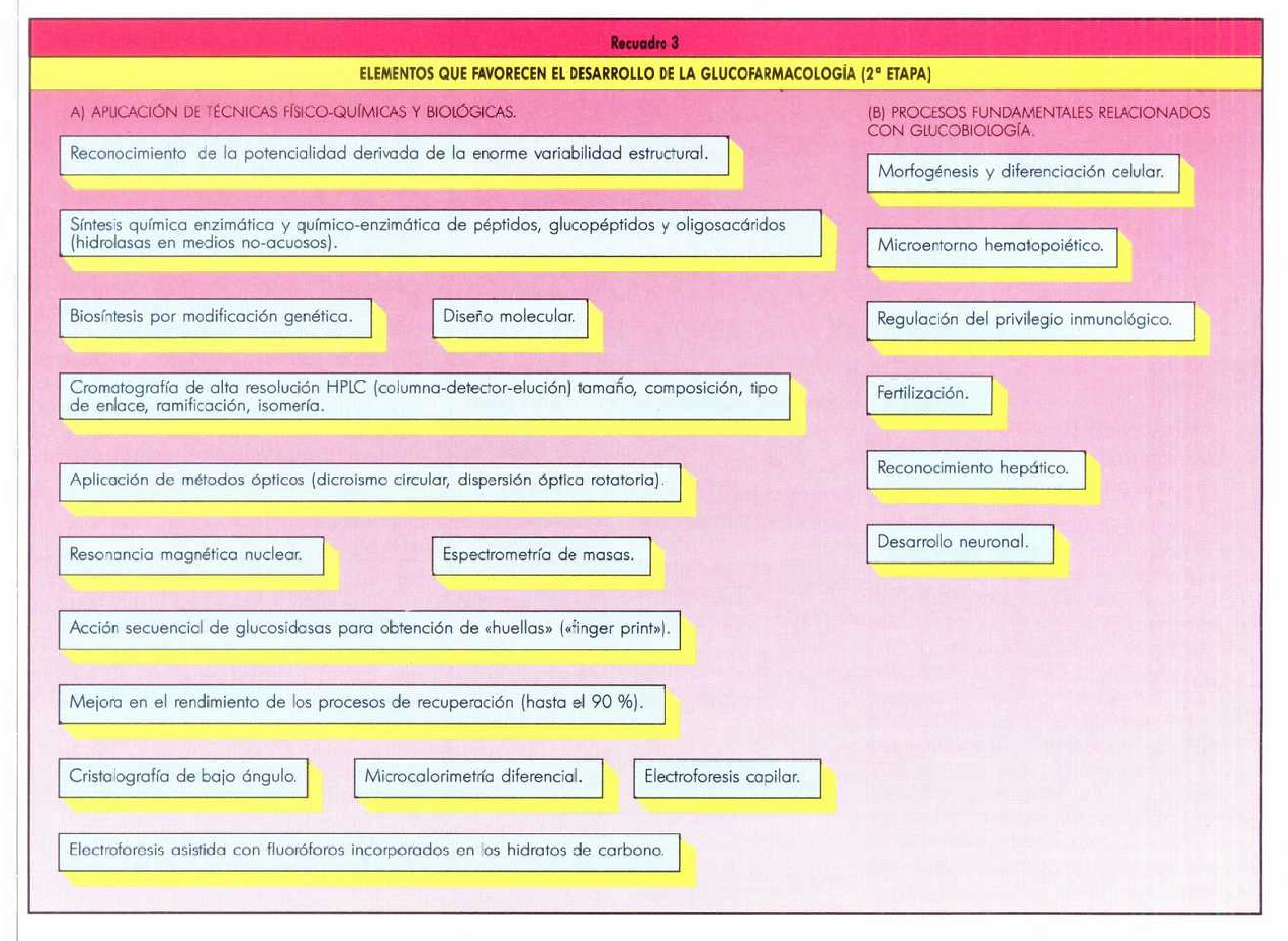
Surge así la glucobiología como nueva subdisciplina dentro de rico campo de desarrollo de la biología que caracteriza a la segunda mitad de este siglo. Se puede afirmar que el núcleo central que justifica la aparición y el desarrollo de la glicobiología y de sus orientaciones hacia la farmacología —glucofarmacología— reside en el papel que juegan los hidratos de carbono en las interacciones proteína-proteína, proteína-célula, y célula-célula.

Algunos de los primeros descubrimientos relativos a este campo se enuncian a continuación: actividad biológica de la heparina; antígenos ABO identificados en los eritrocitos; incidencia en los grupos sanguíneos; antígenos de Lewis; modelo cristalográfico del complejo lisozima- inhibidores oligosacarídicos; identificación de las inmunoglobulinas como glucoproteínas; papel del ácido siálico en el recambio de hematíes; bioquímica de las lectinas; glucosamino-

JUAN PABLO PIVEL
se incorporó a los laboratorios Andrómaco en 1980 como responsable de investigación y ha puesto en marcha un centro de I + D. Actualmente trabaja en el campo de la farmacología de productos naturales.
EMILIO MUÑOZ
es profesor de investigación en el área de biología y biomedicina del CSIC, del cual fue Presidente. Actualmente, trabaja en el Instituto de Estudios Sociales Avanzados donde dirige RUSTEP (Unidad de investigación sobre política científica y tecnológica) y ha puesto en marcha el grupo ESFERAS.

glicanos articulares; enlaces de glucoconjugados. Esta muestra pone de relieve en una primera aproximación la riqueza y complejidad de este área de actividad.

Por otra parte, el enorme desarrollo de la enzimología permitió aislar, purificar y caracterizar un conjunto de enzimas relacionados con la bioquímica de los hidratos de carbono y de los glucoconjugados: endoglucosidasas; exoglucosidasas; glucosiltransferasas, epimerasas; enzimas implicados en la ramificación de las cadenas o en la biosíntesis y degradación de hidratos de carbono y glucoconjugados.



Las primeras puertas hacia la aplicación de los hidratos de carbono en la modulación del sistema inmune (inmunofarmacología) se abren como fruto de la identificación del papel de los constituyentes de los microorganismos en la respuesta inmunológica. Esta primera convergencia entre microbiología e inmunología se ilustra en el recuadro 1 en el que se recoge la experiencia de Coley con las vacunas de mezclas bacterianas. Se puso de manifiesto que se conseguía modificar las respuestas inmunológicas similares a las producidas por las bacterias enteras utilizando fracciones subcelulares purificadas acompañadas por moléculas derivadas de las mismas o bien con estas moléculas utilizadas aisladamente (fundamentalmente fracciones de la pared celular, de la membrana o de los ribosomas).

Todos estos elementos celulares son estructuras complejas en los que dominan algunas macromoléculas específicas, todas ellas con una relevante participación de los hidratos de carbono.

De hecho, un paso decisivo para el avance sustancial de la inmunofarmacología radicó en la elucidación de la estructura de las paredes microbianas y el aislamiento de entidades moleculares más o menos definidas responsables de los efectos biológicos. Algunas de estas moléculas se recogen en el recuadro 2.

Las endotoxinas tienen una acción ambivalente. Por un lado, actúan como agentes desencadenantes de síntomas patológicos, desde el efecto anunciador de los escalofríos y la fiebre hasta el choque irreversible —fallo circulatorio que genera la muerte—. Se convierten en escudo protector de las bacterias que las portan, bloqueando la acción de muchos antibióticos. Paradójicamente, estas moléculas tan agresivas para la salud humana pueden estimular la resistencia inmunitaria de los organismos ante infecciones bacterianas o víricas o, incluso, frente al cáncer. El muramil dipéptido es una estructura propia de los bacterias, la subunidad de una macromolécula característica de la pared celular de las bacterias, a la que confiere rigidez. Sus efectos en la estimulación del sistema inmunitario son hoy en día indiscutibles. Los polisacáridos de la pared de levaduras, glucanos y mananos, aunque aparentemente menos específicos, juegan un papel selectivo en las propiedades de esos microorganismos para su defensa y capacidad de ataque, aunque aislados tienen propiedades inmunomoduladoras propias. El dimicolato de trehalosa es un componente de la pared celular de las micobacterias, mucho más rica en lípidos que la pared celular de otras bacterias. Ejerce un efecto estimulante general del sistema inmunológico.

Sobre estas bases, surge la primera generación de productos relacionados con la glucofarmacología, que se caracterizan por los hechos básicos que se recogen a continuación como primera generación en a la glucofarmacología. Se acumula enorme cantidad de información a acerca de la actividad farmacológica de polisacáridos; se extiende el *screening* a polisacáridos de distintos orígenes microbianos, de origen vegetal o animal; se detectan importantes actividades farmacológicas y se descubren múltiples aplicaciones parafarmacéuticas como son el uso para espesantes o antirreflujantes, o el uso galénico como hipolipemiantes, hipoglucemiantes, inmunomodulares, hematorrestauradores, cicatrizantes y anticoagulantes.

Sin embargo, esta explosión de datos no llegó a fructificar plenamente en especialidades farmacéuticas en virtud de determinadas causas entre las que cabe mencionar las siguientes: la ausencia de una base biológica clara; las carencias en la identificación y caracterización química de las moléculas activas; la aplicación de criterios de pureza poco fiables; la ausencia de estudios sistemáticos de estructura-función; las deficiencias en el conocimiento sobre la metabolización y efecto hepático (implicación del P450). La situación actual parece evolucionar favorablemente hacia una segunda generación de la glucofarmacología gracias al desarrollo en dos aspectos fundamentales: el avance en la química-física de los hidratos de carbono y el propio progreso temático de la glucobiología. Los avances más significativos en estos dos sectores se resumen en el recuadro 3.

LOS HIDRATOS DE CARBONO DESEMPEÑAN UN PAPEL REGULADOR EN LOS FENÓMENOS DE RECONOCIMIENTO

■

Dentro de la amplitud de funciones recogidas, la adhesión celular aparece como el factor común para su regulación. Es evidente que la regulación de la adhesión celular es un objetivo farmacológico de gran significado para controlar un amplio número de patologías. El fenómeno de la adhesión tiene sus raíces en el lenguaje de la interacciones celulares. Aunque se desconoce la mayoría de las bases químicas implicadas en los fenómenos de reconocimiento celular empiezan a abundar los indicios que soportan el papel de los hidratos de carbono como marcadores principales de esos procesos de reconocimiento.[1] Se acepta generalmente que las células se reconocen entre sí gracias a la existencia de parejas de estructuras complementarias situadas en la superficie. Todas las células poseen una envoltura en la que predominan glucoproteínas y glucolípidos, dos tipos de macromoléculas en las que los hidratos de carbonos (azúcares) están unidos a proteínas y lípidos. Se conocen varios miles de estos compuestos y su número crece de un modo vertiginoso.

Por otro lado, el descubrimiento de las lectinas ha dado su sentido al otro lado del proceso. Las lectinas son unas proteínas que interaccionan y se combinan con los hidratos de carbono con rapidez, selectividad y responsabilidad. En un principio, se consideró que eran exclusivas del mundo vegetal, pero posteriormente se ha descubierto su presencia en todos los organismos. Poseen una gran especifidad, siendo capaces de distinguir no sólo entre monosácaridos, sino también entre diferentes oligosacáridos. En este contexto la fig. 1 muestra un esquema de cómo puede ser la actuación de los glucoproductos respecto a la regulación de los procesos de reconocimiento celular.

El papel regulador de los hidratos de carbono encuentra una magnífica representación en el modo en que influencian las propiedades de las glucoproteínas entre las que cabe mencionar: la actividad biológica, la estabilidad térmica y a la digestión por proteasas, el recambio hepático y la regulación de las propiedades farmacológicas. Dentro de este contexto surge la segunda generación de proteínas recombinantes de uso terapéutico en las que la función de las proyecciones o «antenas» oligosacarídicas aparece como fundamental. Entre un gran número de ejemplos, cabe mencionar como un caso fascinante el de las inmunoglobulinas. Estas proteínas portan más de 30 complejos biantenarios de oligasacáridos N-glucosídicos. Se ha demostrado, por ejemplo, que en enfermedades de tipo inflamatorio como es el caso de la artritis reumatoide, el patrón de glucosilación de la inmunoglobulina sérica cambia con respecto a las condiciones normales. La mayor diferencia estructural se cifra en dos residuos de galactosa en una de las «antenas». Esta pequeña diferencia estructural sería la responsable de la pérdida de la anergia B; la inhibición de la correspondiente galactosil transferasa estaría determinada por un inmunomodulador, la citoquina conocida como interleucina 6. Este ejemplo permite concluir en lo que ya se señalaba anteriormente acerca del papel fundamental que desempeñan los hidratos de o carbono en la vida social, en su sentido más amplio, que rige a las moléculas y células y determinan la *calidad* de la superficie celular.

Es obvio que se abre un enorme campo a la farmacología experimental con la posibilidad de controlar racionalmente la relación proteína-proteína,

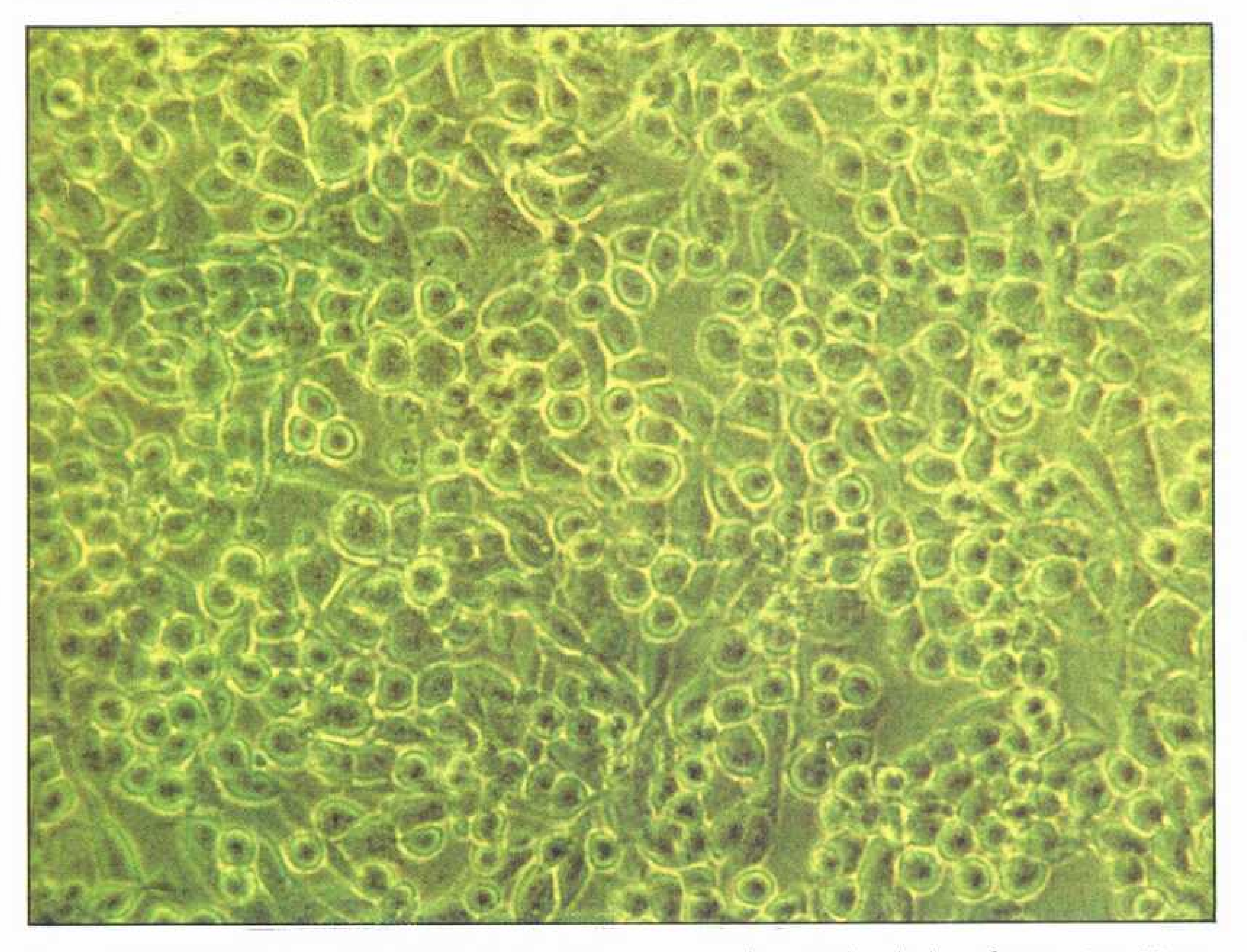
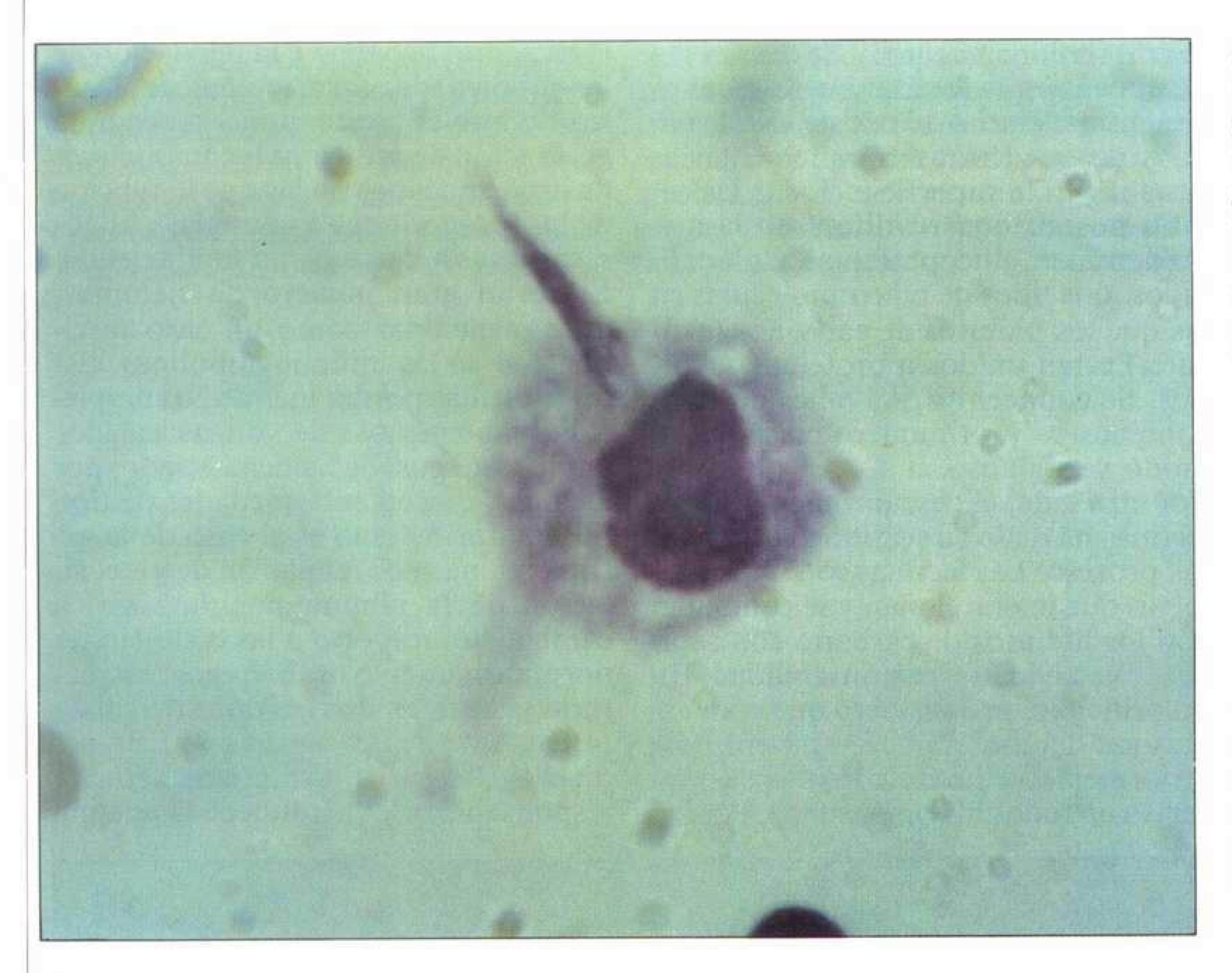


Figura 2. Inhibición, por el tratamiento in vitro *con un polisacárido, de los efectos citopáticos producidos por la infección con el virus murino (VSV), sobre la línea celular fibroblástica de ratón L929, a las 48 horas de cultivo (x 200). (Foto autor.)*

(1) N. Sharon y H. Lis, «Carbohidratos en el reconocimiento celular», *Investigación y Ciencia*, pp. 20-27, marzo, 1993.

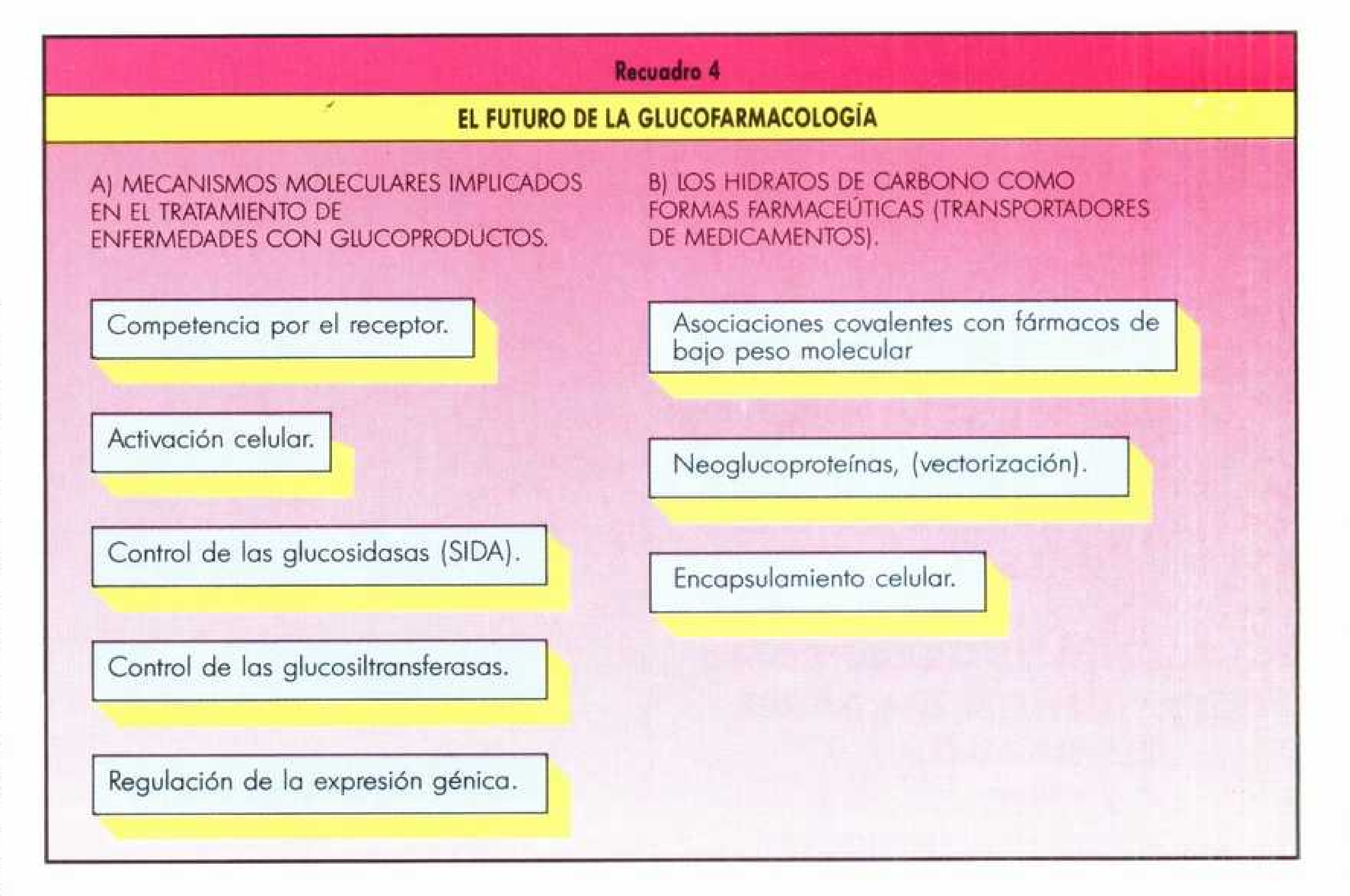


▲
Figura 3. Interacción de promastigotes de Leishmania Donovani con macrófagos peritoneales de ratón, activados por el tratamiento «in vivo» con un polisacárido. Tinción MayGründwald Giemsa (x 100). (Foto autor.)

proteína-célula y célula-célula. Sin embargo, la complejidad y finura estructural que rige estas interacciones va a suponer, sin duda, mayores exigencias por parte de las autoridades regulatorias en la precisión estructural de las glucoproteínas para que pueda aceptarse su utilización como fármacos. De hecho, la Food and Drug Administration, la reputada FDA, de los Estados Unidos, ha asumido una posición a este respecto, aceptando el concepto de las «glucoformas» —un concepto que fue introducido por nosotros hace casi dos décadas en los estudios sobre la ATPasa transductora de energía de las membranas bacterianas—, y tratando de identificar cuál es la mejor forma y cuándo son distintas en el sentido de ser consideradas como entidades diferentes. Como es, por otro lado, lógico la FDA persigue una profundización en el caso de estos productos sobre los efectos clínicos, la seguridad y la posibilidad de sus aplicaciones por vía oral.

El número de enfermedades que pueden considerarse como objetivos para ser atacados con fármacos de naturaleza sacarídica es cada vez más mayor. Entre ellas se pueden citar las heridas y quemaduras («wound healing»); los procesos virales y parasitarios; la hipofunción hematopoiética; la desregulación inmunológica; la inflamación; las enfermedades autoinmunes y las infecciones bacterianas. Aunque su amplitud puede sorprender, es indudable que hoy se cuenta ya con una base racional desde el campo de la glucobiología para actuar sobre este abanico de enfermedades. Los posibles mecanismos moleculares implicados en estos procesos, así como el potencial uso de los hidratos en nuevas aplicaciones galénicas se presentan en el recuadro 4.

Parece lógico pensar que una profundización en el conocimiento básico en las propiedades físicoquímicas de los hidratos de carbono junto con el desarrollo operativo de la glucobiología permitirán en el futuro generar nuevos productos en los que las complejas fracciones polisacarídicas y proteínicas se puedan sustituir por componentes de menor talla, oligosacáridos, peptidos y glucopéptidos, o incluso reemplazar por moléculas miméticas basadas en el uso del diseño asistido sobre las informaciones estructurales suministradas por cristalografía y resonancia magnética nuclear.



Recuadro 4

EL FUTURO DE LA GLUCOFARMACOLOGÍA

A) MECANISMOS MOLECULARES IMPLICADOS EN EL TRATAMIENTO DE ENFERMEDADES CON GLUCOPRODUCTOS.	B) LOS HIDRATOS DE CARBONO COMO FORMAS FARMACEÚTICAS (TRANSPORTADORES DE MEDICAMENTOS).
Competencia por el receptor.	Asociaciones covalentes con fármacos de bajo peso molecular
Activación celular.	Neoglucoproteínas, (vectorización).
Control de las glucosidasas (SIDA).	Encapsulamiento celular.
Control de las glucosiltransferasas.	
Regulación de la expresión génica.	

LA BIOTECNOLOGÍA SE CONFIGURA COMO UN NUEVO PARADIGMA TECNOLÓGICO

■

El progreso científico y técnico se enmarca en una situación internacional influida por la idea de la competitividad y por el tecnoglobalismo. Esta situación ofrece además un enfoque particular sobre la relación de competencia entre los tres grandes bloques. Esta tendencia es dominante y ejerce un efecto de arrastre en los países con menor tradición en el mundo de la ciencia y la tecnología hasta el punto de que la estrategia de estos países, a los que podíamos calificar de pequeños en términos de su sistema científico-técnico, es puramente seguidista de la que practican los grandes o, simplemente, de la que se cruza entre los bloques.

Parece evidente que la continuidad por este camino no representa ninguna solución y uno de nosotros ha señalado en repetidas ocasiones la conveniencia de buscar «nichos» que faciliten la identificación de áreas de actuación propia en las que se pueda encontrar

un terreno adecuado, en el que se construya una identidad tecnológica que permita competir satisfacoriamente, o al menos, sobrevivir en momentos de crisis.
La biotecnología se configura como un nuevo paradigma tecnológico en el que es posible identificar trayectorias para avanzar en la línea expuesta. La horizontalidad, versatilidad y repercusión social de las aplicaciones de la biotecnología las hacen poseedoras de un gran potencial en este sentido. La glucobiología es un área particularmente interesante por encontrarse en la confluencia de la vieja biotecnología por cuanto puede recurrir al uso de materias primas o recursos naturales, y combinar esta utilización con el empleo de las orientaciones que supone la nueva biotecnología. El significado del área de la glucobiología dentro de la biotecnología se reconoce institucionalmente. Noruega ofrece un interesante ejemplo a este respecto. Recogiendo la vieja tradición vikinga sobre el empleo de las algas como agentes terapéuticos, viene desarrollando un notable sector industrial que reúne intereses académicos y productivos.

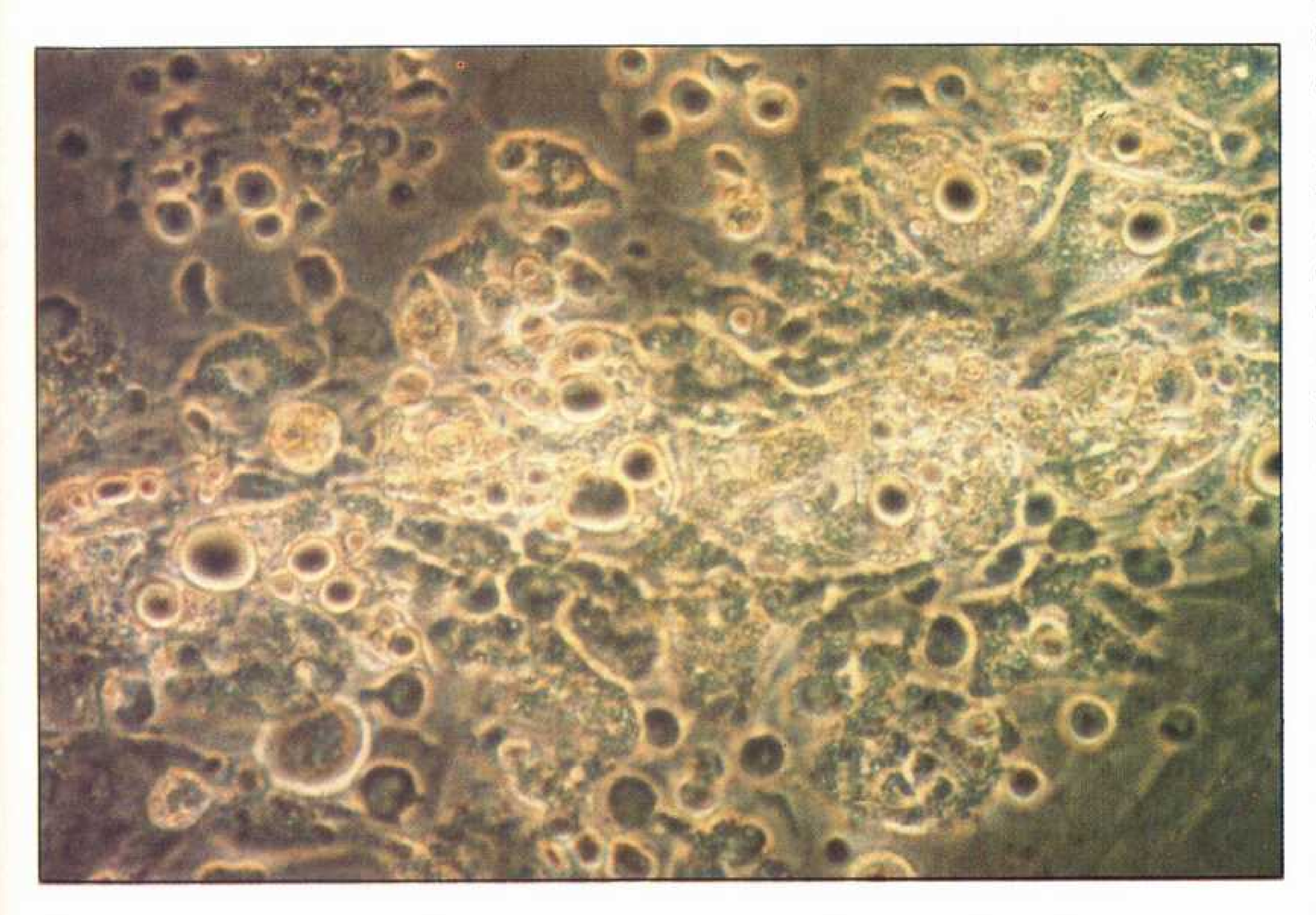


Figura 4. Microfotografía de la capa adherente del cultivo de larga duración de médula ósea de ratón (LTBMC), tras el tratamiento in vitro *con un polisacárido, (x 200). (Fotografía cedida por Gabriel Maganto, CIEMAT.)*

ESTRATEGIAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN GLICOBIOLOGÍA

■

La glicobiología ha transformado una glucofarmacología primaria empírica, en una glucofarmacologia racional basada en ella y reconocida como rama de la farmacología. La búsqueda de nuevos fármacos es sin duda una investigación apasionante no sólo por su inherente multidisciplinaridad sino también por su indudable e inmediata repercusión social. Es además, una investigación de alto coste en función del gran número de ensayos exigidos para evaluar no sólo la actividad deseada sino los posibles efectos laterales. Datos recientes estiman en 12 años y 250 millones de dólares, el tiempo y coste necesarios para introducir un nuevo fármaco en el mercado.
En la investigación farmacéutica clásica se realiza un *screening*, es decir, un proceso mediante el cual un elevado número de moléculas de síntesis orgánica son ensayadas en un conjunto preestablecido de bioensayos. Un procedimiento similar sustituye la síntesis orgánica por extractos obtenidos fundamentalmente de plantas recolectadas al azar (*random collection*), por cultivos de microorganismos o por extractos de otras fuentes biológicas. Ambos métodos han permitido éxitos indudables y confluyen cuando una molécula de origen natural es modificada químicamente. De hecho una molécula «cabeza de serie» o (*lead product*) origina una familia de moléculas similares que con ligeras modificaciones presente una optimización de su efectividad.
Un inconveniente de esta metodología es su alto coste. De hecho, se manejan números tales como 10 000 síntesis o 30 000 extractos analizados como los que hay detrás de cada principio activo que llega al mercado. Puesto que los estudios toxicológicos y clínicos son los de mayor incidencia económica, parece lógica la búsqueda de métodos alternativos para reducir costes en las fases más tempranas de la investigación. Cabe también una consideración referente al peligro adicional constituido por los, a veces, impredecibles efectos tóxicos de las nuevas moléculas surgidas de la síntesis orgánica.
Una alternativa válida se basa en los intentos de trabajar en base a un diseño racional del futuro fármaco. Una posibilidad es la que surge del impresionante conocimiento de los procesos biológicos a nivel molecular. Así, por ejemplo, se pueden diseñar por técnicas de modelado molecular (*molecular modelling*) inhibidores enzimáticos o bloqueantes de un receptor a partir del conocimiento de la estructura tridimensional del enzima o del receptor. ¡De hecho la farmacología asociada puede hacerse de manera virtual!
Otras posibilidades son, por ejemplo, el diseño de inmunotoxinas en las que un tóxico celular es orientado («vectorizado») hacia la célula diana mediante un anticuerpo monoclonal o el desarrollo de proteínas recombinantes como fármacos: insulina, hormona del crecimiento, interferones, etc., y por supuesto el desarrollo de la glucobiología que hoy, y tal como se expone en el presente artículo, engloba áreas tales como la glucotecnología y la glucofarmacología. Es decir, el reconocimiento del papel que los azúcares desempeñan en los procesos biológicos permite una nueva y prometedora base para el diseño racional de nuevos fármacos.
Esto se refleja en un creciente número de congresos entre los que cabe mencionar: *International Perspectives in Glycobiology*, Oxford, Inglaterra, setiembre, 1991; *Carbohydrate based Pharmaceuticals- Glycotechnology*. San Francisco, Estados Unidos, mayo, 1993; *Carbohydrate Recognition in Cellular Function*, Ciba Foundation Symposium, Londres, Inglaterra, noviembre, 1988; así como el último *Congreso de la Federación de Sociedades Europeas de Bioquímica*, celebrado en Suecia. El mundo sajón, siempre más académico, ha puesto en marcha una revista que se edita bajo el título «Glycobiology». A su socaire emerge como ya se ha mencionado, alguna industria. La Comunidad Europea también participa a través de sus organismos especializados del esfuerzo en el campo de la glucobiología. En este sentido: la Concertation Unit for Biotech-

nology in Europe (CUBE) ha contribuido a la creación del Centro de Valoración de Glúcidos (Amiens, Francia).[2] Es creciente también el número de empresas en el área de la Glucotecnología. El mayor inconveniente en la situación actual está en el alto coste de oligosacáridos de síntesis contrapuesto al bajo coste pero relativa indefinición química de los polisacáridos de origen natural en tanto que sistemas polidispersos. Sin embargo, los procesos técnicos en la glucoquímica permitirán sin duda a corto plazo superar estas dificultades.

Un camino alternativo al diseño racional de fármacos se basa también en la Etnofarmacología (fig. 4). La Etnofarmacología la podríamos definir como la disciplina que intenta establecer las bases científicas del conocimiento empírico de las propiedades curativas de productos naturales y que es acervo cultural de una gran parte de la humanidad. De hecho, ¡de la mayoría de la misma! Es, sin duda, un enorme desafío que este conocimiento no desaparezca definitivamente por el aniquilamiento de la biodiversidad y la pérdida de las culturas tradicionales.

Un número creciente de publicaciones reflejan estas inquietudes: *Conservation of Medicinal Plants*, O. Aberele, V. Heywood y H. Synge (Eds.); *Proceedings of an International Consultation (WHO)*, Ching Mai, Tailandia, marzo, 1988, Cambridge University Press; *New Drugs from Natural Sources*, IBC Technical Services, J. Coomber (Ed.), Londres, 1992; (esta publicación cubre no sólo aspectos etnofarmacológicos sino otras aproximaciones metodológicas tomando como partida una fuente natural) *Abstract Book Second International Congress on Etnofarmacology*, Upsala, Suecia, julio, 1992; *Biofutur. Le mensuel europeen de biotechnologie. Special Biologie des sucres*, julio-agosto, 1993; así como la publicación periódica *The Journal of Ethnopharmacology*, Elsevier.

De hecho Farnsworth ha estudiado alrededor de 120 fármacos modernos derivados de plantas comparando su uso moderno con su uso tradicional, encontrando un 74 % de correlación positiva y confirmando el valor del uso de la medicina tradicional como fuente de nuevos fármacos. *Farnsworth N.R. Screening for new medicines. Biodiversidad*, E.O. Wilson (Ed.), National A. Press, Washinton, 1988; son importantes también las siguientes referencias: *Abstract Book. First World Congress on Medicinal and Aromatic Plants for Human Welfare*, Maastricht, Holanda, julio, 1992; *Drugs of Natural Origin*, Swedish Pharmaceutical Press, Estocolmo, Suecia, 1992.

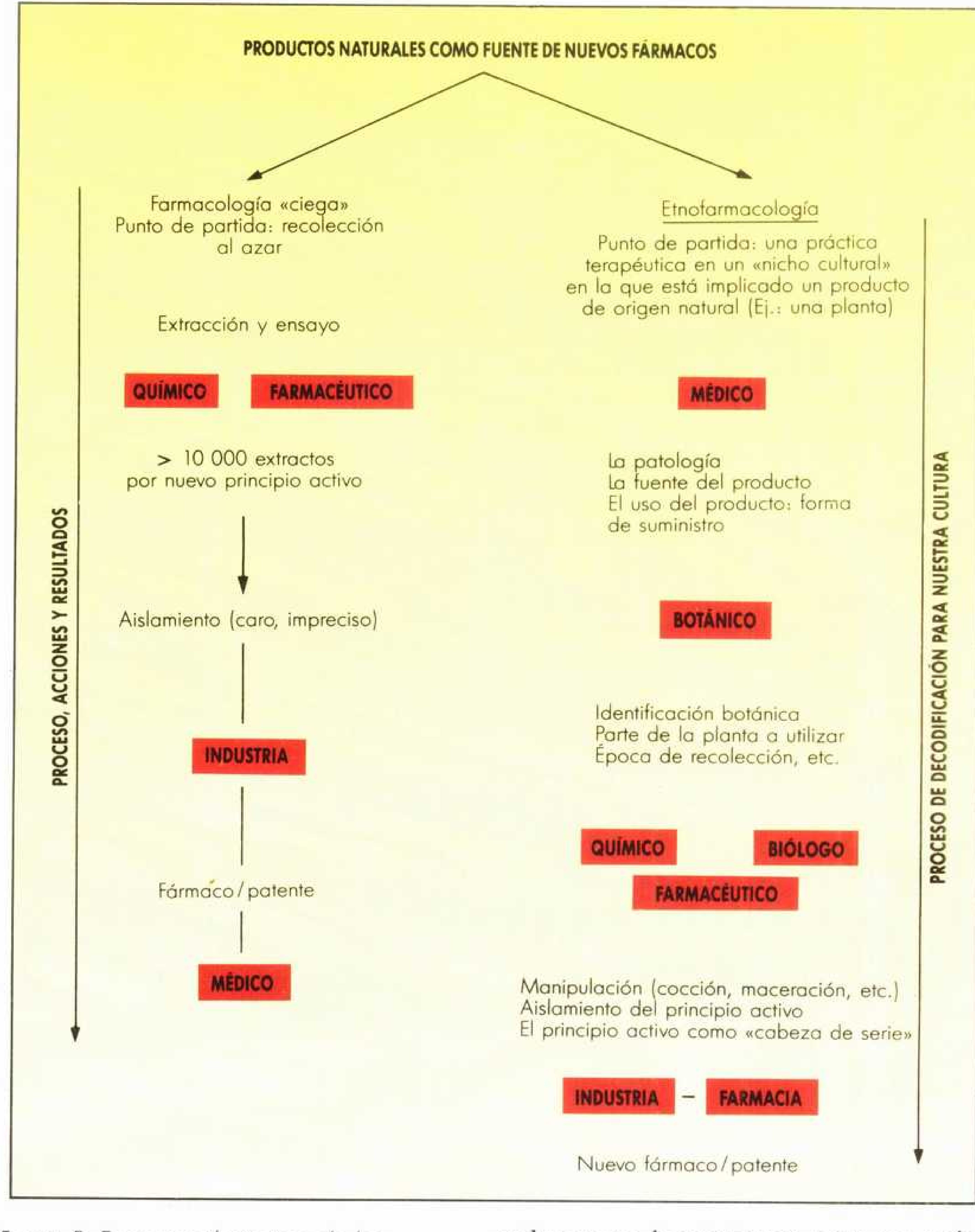


Figura 5. Esquemas ilustrativos de los procesos de obtención de nuevos fármacos a partir de productos naturales según una farmacología inspirada en el ensayo (farmacología «ciega») o en la etnofarmacología en la que el aporte cultural proporciona una base de racionalidad. El proceso de transformación o de decoficación para la obtención de un fármaco parece ajustarse a un planteamiento más racional cuando se acude a la etnofarmacología como punto de partida.

El *screening* ciego o la recolección al azar puede ser sustituido entonces por el aprovechamiento de conocimientos cuyo origen se pierde en el pasado del hombre. Lógicamente este enfoque exige el trabajo multidisciplinario de médicos "decodificadores" de la práctica curativa del chamán o terapeuta, de botánicos, químicos y farmacólogos y también el apoyo mediante la potenciación de Jardines Botánicos y bases de datos tales como la NAPRALERT (universidad de Illinois).

Todas estas consideraciones son particularmente importantes para un país como España dada su biodiversidad, la importancia y pervivencia de su medicina popular y la vinculación con América Latina, en la que en función de su riqueza biológica se están estableciendo redes de investigación farmacológica de productos naturales, algunas de ellas vinculadas al programa CYTED (un programa de cooperación sobre objetivos entre científicos españoles y de países latinoamericanos).

La vinculación a estos esfuerzos es la continuación histórica de la hazaña del Descubrimiento de América, sin duda el mayor transvase biológico de la historia de la humanidad: *Herbolario de Indias. Historia Natural del Nuevo Mundo*, Sevilla, 1565. Edición moderna preparada por E. Demot y N. Satanonsky, Turner, México, 1990; *Comentarios químico farmacéuticos de la Historia Española en América*, Francisco Giral González (Ed.) universidad de Salamanca, España, 1980; *Historia social y cultural del Río de la Plata (1536-1810)*, Guillermo Furlong S.I.

(Ed.), Tipográfica Editora Argentina. Buenos Aires, Argentina, 1969; *José Sánchez Labrador y los naturalistas jesuitas del Río de la Plata*, monografías de la Dirección General del Medio Ambiente, MOPU, Madrid, España, 1989.

LA PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA EN EL DESARROLLO DE LA GLICOBIOLOGÍA ES NOTABLE

■

En este marco histórico social y científico se plasma y realiza el esfuerzo investigador de Laboratorios Andrómaco. Este marco consiste por lo tanto en la explotación científica y tecnológica de «nichos nacionales específicos» por contraposición a una estrategia basada en la distribución internacional de las tareas de investigación y desarrollo. Su ejecución práctica implica la síntesis de todos los factores mencionados, con un esfuerzo empresarial moderno e innovador capaz de movilizarlos.

Este esfuerzo investigador comienza en Laboratorios Andrómaco a finales de la década de los setenta. Los hechos han demostrado tenazmente que lo que ayer era una actividad pionera basada en la intuición y centrada en productos naturales, en particular polisacáridos, hoy es una actividad consolidada basada racionalmente en los más importantes avances científicos recientes: la glucobiología y la inmunología. De hecho la investigación en polisacáridos está estrechamente ligada a la inmunología y lo que ayer era un conocimiento empírico de la actividad de estas moléculas sobre el sistema inmune hoy está sólidamente fundamentada.

Podríamos afirmar que la inmunofarmacología moderna es una rama consolidada de la farmacología tal como se recoge en el número monográfico de la publicación Immunology Today.[3]

El primer producto de investigación de Laboratorios Andrómaco fruto de este esfuerzo investigador ha sido un Modificador de la Respuesta Biológica (MRB) de naturaleza polisacarídica y de origen en medicina popular, ya ampliamente comercializado.

Una vez consolidada la línea de investigación y a partir de 1988, llevada a cabo en el nuevo Centro de Investigación y Desarrollo, se establecieron planes concertados de investigación con financiación del CDTT y participación de importantes centros de investigación oficiales: «Estudio y desarrollo de polisacáridos como agentes activadores de recuperación hematopoyética», Gabriel Maganto (CIEMAT); «Estudio del mecanismo de acción del TNF u otros MRB y de su efecto potenciador de respuesta en sistemas leucocitarios humanos», Francisco Sánchez-Madrid (Hospital de la Princesa) y Prof. Dr. Manuel Fresno (Centro de Biología Molecular); «Estudio y desarrollo de polisacáridos como agentes antivirales», Luis Carrasco (Centro de Biología Molecular) y Juan Antonio Leal (Centro de Investigaciones Biológicas); que han permitido el logro de importantes e innovadores avances trasladando a la experimentación farmacológica modelos experimentales básicos tales como los basados en antígenos leucocitarios, cultivos de médula ósea de larga duración y en mecanismos de infección viral.

La ejecución de estos proyectos ha sido paralela al establecimiento en el nuevo Centro de investigación, de laboratorios de inmunología, farmacología, microbiología, seguridad de fármacos y hematología, así como de una importante área de investigación en química de azúcares, esta última bajo la dirección de Antonio Guerrero Gómez-Pamo.

Nuevas confluencias tales como el cultivo de células vegetales o la biotecnología del ADN aplicada a plantas, consolidarán y ampliarán este área de investigación y desarrollo. También nuevos problemas deben ser afrontados en relación con la industrialización de los hallazgos, tales como la patentabilidad de productos de origen natural o un acuerdo diplomático, político y económico que haga compatible el desarrollo con la preservación de la biodiversidad (Conferencia Río de Janeiro, 1992).



Figura 6. Fagocitosis de Candida albicans *por macrófagos peritoneales de ratón activados por el tratamiento* in vivo *con un polisacárido. Tinción de May Gründwald Giemsa (x 100). (Foto autor.)*

Desde el punto de vista industrial, y consecuencia directa de dichos planes o en relación a sus modelos experimentales, son el desarrollo de un fármaco estimulador de la recuperación hematopoyética, de un nuevo agente antiviral, y de un inmunosupresor extraído de un extracto de un helecho americano ya descrito en los relatos del Descubrimiento y cuya información se recoge en el *Tratado de Materia Farmacéutica Vegetal*[4] de Juan R. Gómez-Pamo, N. Moya (Ed.), Madrid, 1893. Asimismo, se ha establecido un programa de *screening* para actividad hipolipemiante y otro para actividad estimuladora de la regeneración tisular del que ha surgido un producto, ya en fase de desarrollo, de naturaleza polisacarídica y origen vegetal.

El camino desde una glucofarmacología empírica a otra basada en la glicobiología, y de la glucofarmacología como área de la farmacología, ha sido largo, como también lo ha sido el recorrido desde el conocimiento empírico del uso de extractos de plantas y otras fuentes naturales al descubrimiento y racionalización del uso de sus principios activos.

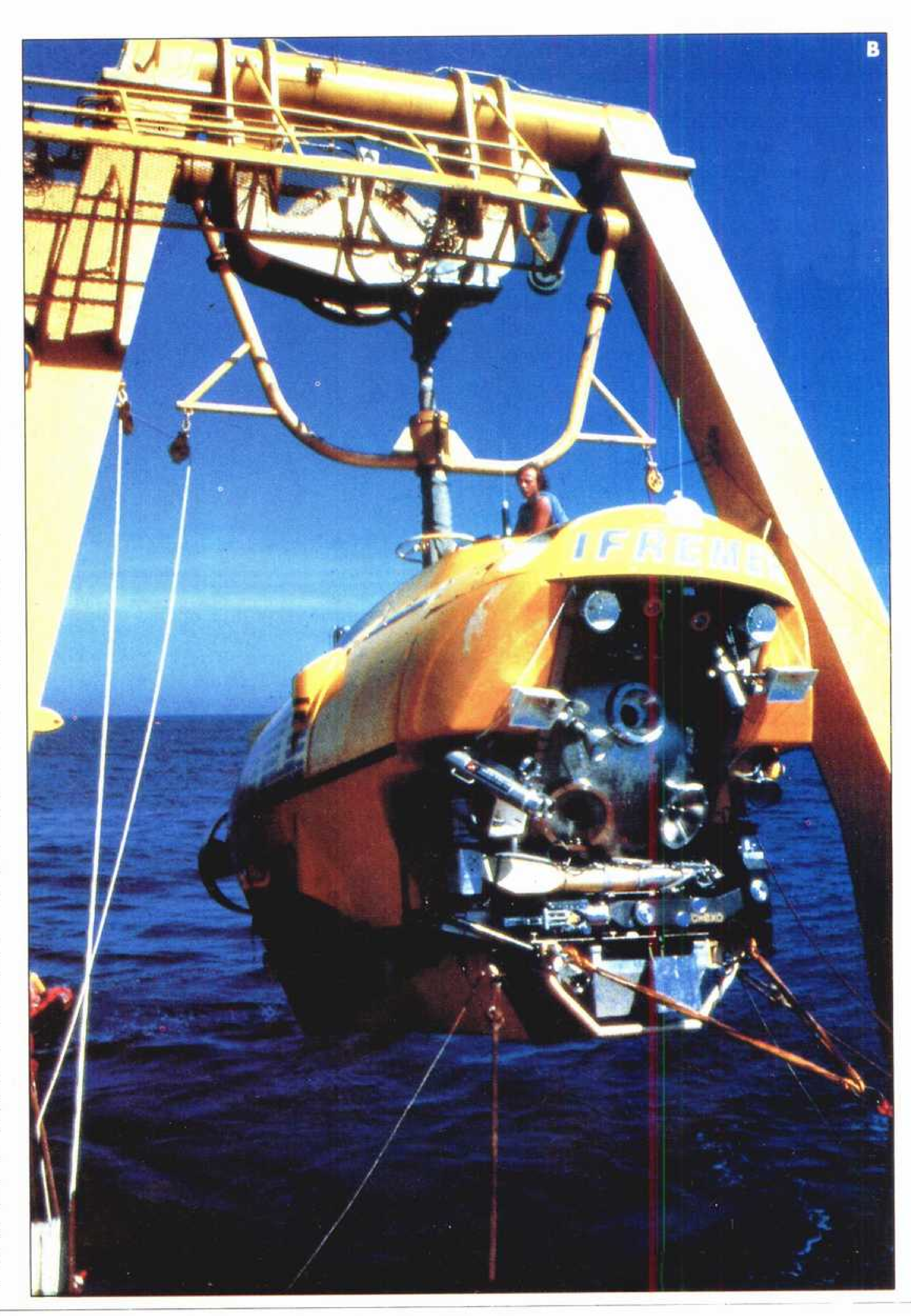
Un largo camino de Descubrimiento que nos hace repetir las palabras que el Descubridor escribiera en su Diario el 14 de octubre de 1492: «... *Y vide muchos árboles muy disformes de los nuestros, y dellos muchos que tenían los ramos de muchas maneras y todo en un pie, y un ramito es de una manera y otro de otra, y tan disforme que es la maravilla del mundo, cuánta es la diversidad de una manera a la otra...*». ■

(2) *Towards a Carbohydrate based Chemistry*, Report EUR 12757 EN, CEE, Proceedings Amiens, Francia, octubre, 1989.
(3) *Immunology Today*, vol. 14, nº 6, julio, 1993, recogido en Trends in Pharmacological Science, vol. 14, nº 5, mayo, 1993.
(4) J.R. Gómez-Pamo N. Moya (Ed.), *Tratado de Materia Farmacéutica Vegetal*, Madrid, 1993.

LOS SUBMARINOS DE EXPLORACIÓN

EN VEINTICINCO AÑOS DE EXPLORACIÓN OCEANOGRÁFICA, NUESTRA VISIÓN DE LOS ABISMOS SE HA MODIFICADO PROFUNDAMENTE. ZONAS ENTERAS DEL OCÉANO, QUE ANTAÑO ESCAPABAN A LA OBSERVACIÓN, SE MANIFIESTAN AHORA GRACIAS A LOS SUBMARINOS PROFUNDOS. PERO DEL ARQUÍMEDES AL NAUTILO, LA PUESTA A PUNTO DE ESTOS INGENIOS EXIGE PROEZAS TÉCNICAS. ESTE ARTÍCULO ILUSTRA LA MULTIPLICIDAD Y LA COMPLEJIDAD DE LOS PARÁMETROS QUE SE HAN DE TENER EN CUENTA PARA CONSTRUIR LA FUTURA GENERACIÓN DE SUBMARINOS... LA QUE PODRÍA DESCENDER MÁS ALLÁ DE 6 000 METROS.

DOMINIQUE GIRARD

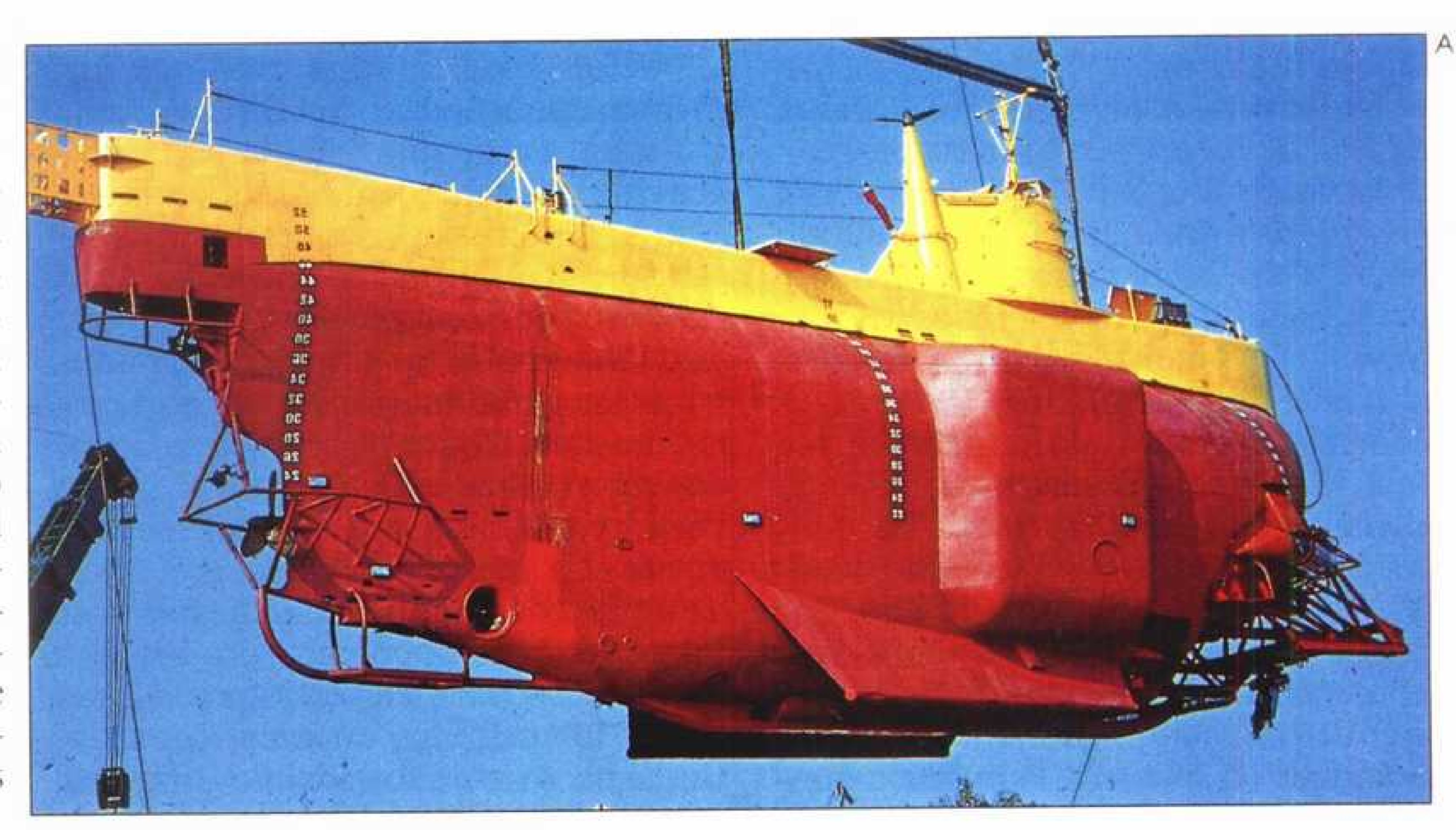


En los últimos veinte años, los submarinos tripulados han efectuado entre 5 000 y 6 000 inmersiones a más de 2 000 metros de profundidad, lo que representan entre 40 000 y 50 000 horas, 50 a 70 meses de una estancia de tres personas; el mismo orden de magnitud que las permanencias en el espacio. Después de la época de las marcas y de los desafíos técnicos, ahora ha llegado la de los investigadores que estudian la historia de la Tierra, la tectónica de placas y las fuentes hidrotermales (véase «Los oasis efímeros de las zonas abisales: el final de un paradigma», *Mundo Científico*, nº 139, octubre, 1993).

El submarino «profundo» es, actualmente, el único medio de llevar a un observador científico al fondo del océano para estudiar un lugar, un fenómeno, una situación, un acontecimiento. Le permite permanecer de cinco a siete horas en el fondo con una relativa comodidad, ver, fotografiar, filmar, medir, registrar, tomar muestras (conservando eventualmente las condiciones del medio), dejar en el lugar una estación autónoma de medida y finalmente regresar allí a intervalos más o menos regulares. Visión directa y global, presencia física e intelectual, he aquí dos de las ventajas del submarino.

Actualmente, los investigadores tienen a su disposición toda una panoplia de submarinos eficaces, relativamente ligeros, manejables. *Cyana* y el *Nautilo*, en Francia, el *Alvin* en Estados Unidos, el *Shinkai 6 500* en Japón, les han permitido explorar zonas situadas a profundidades que llegan hasta los 6 000 metros. ¿Se puede confiar en descender en un futuro próximo todavía más allá, hasta estas profundiddes superiores a 6 000 metros que representan del 2 al 3 % de la superficie de los océanos? ¿Cuáles son los problemas técnicos que hay que re-

solver? También hay que preguntarse si no se tiene que abandonar la idea misma de un submarino tripulado. Y, además, ¿el presupuesto de un submarino tripulado muy profundo se ajusta a la escala de un solo país o hay que recurrir, como en el caso de algunos aceleradores de partículas, a una asociación de países y de organismos? ¿Hay finalmente una demanda científica real de un submarino de este tipo? Dicho de otro modo, ¿el 2 al 3 % de la superficie del océano que se le escapan, tienen el suficiente interés para movilizar a la investigación técnica y a la industria y proporcionar los 6 000 a 10 000 millones de pesetas necesarios para fabricar un ingenio seguro y eficaz? Preguntas todas



A

Figura 1. El submarino profundo ha permitido que el hombre intervenga directamente en los fondos oceánicos. A los pesados batiscafos de los años 60 cuyo último representante fue el francés Arquímedes (A) (22 metros de longitud, 5 metros de anchura, 5 metros de altura y un peso vacío de 58 toneladas), les sucedieron sumergibles de pequeño tamaño, más ligeros y más manejables, como el Nautilo (B). Éste mide 8 metros de longitud, 2,7 metros de anchura y 3,45 metros de altura y pesa 18,5 toneladas. La esfera (C) situada delante permite embarcar tres personas. Una de las características de este submarino, respecto a los batiscafos, reside en el hecho de que la flotabilidad del aparato ya no la proporciona el enorme depósito de carburante, sino en parte la propia esfera, fabricada con una aleación de titanio muy resistente, de una densidad inferior a la de los aceros y por tanto de peso reducido. (Fotos IFREMER.)

éstas a las que los usuarios de los submarinos tienen que contestar actualmente.

A menudo se hace remontar la primera generación de submarinos científicos al diplomático francés Benoît de Maillet quien, en 1734, imaginaba un sumergible que permitiese realizar operaciones de correntimetría «allá donde no pueden llegar los buceadores». El 15 de agosto de 1934, el biólogo norteamericano William Beebe realizaba una inmersión récord de 908 metros a bordo de una esfera suspendida de un cable, la *Batisfera*, construida por otro norteamericano, Otis Barton. Dos siglos separan estas dos fechas, dos siglos sembrados de proyectos, de especulaciones, de semifracasos y de medios éxitos; dos siglos durante los cuales un centenar de locos de la inmersión estuvieron animados por la misma pasión de sumergirse en el mar, apoyados en un dominio creciente de las técnicas necesarias y en particular la de los materiales.

Entre 1937 y 1954, Auguste Piccard y Max Cosyns, Pierre Willm y Georges

DOMINIQUE GIRAD ingresó en 1976 en el CNEXO convertido en IFREMER donde ha sido sucesivamente jefe del departamento intervención del hombre bajo el mar, administrador único de Genavir y director de medios y operaciones navales.

Houot, diseñaron y pilotaron los primeros batiscafos. A partir de 1954, hubo, en Francia, la época de los biólogos, con el *FNRS III*, y luego de los geólogos, con el *Arquímedes*. Aquella fue sobre todo la época de los pioneros, ingenieros y operadores, que resolvían todos los problemas relacionados con los materiales, las fuentes de energía, los motores, la telemanipulación, la iluminación, la toma de vistas y la navegación. Nada existía, todo estaba por hacer. Los fondos más profundos se hicieron accesibles, pero a un precio muy elevado. Los batiscafos eran pesados y se tenían que remolcar a baja velocidad hasta los lugares de inmersión. El mantenimiento, la carga de las baterías, la puesta a punto, se tenían que efectuar en el mar. En un ciclo de doce días, apenas se podían sumergir más de tres veces. Cinco batiscafos, el *FNRS II*, el *FNRS III*, el *Trieste I*, el *Trieste II*, y el *Arquímedes* constituyeron la primera generación de sumergibles científicos (véase la tabla). Muy pronto, otros pioneros soñaron con la segunda generación. El comandante J.-Y. Cousteau había participado en los proyectos desde 1948. Submarinista, asistió a los primeros pasos del FNRS III. Inmediatamente, captó el interés de este nuevo medio, pero también los inconvenientes debidos a su tamaño, su peso y su precio de fabricación. Para él, Jean Mollard, el ingeniero que concretó muchas de sus ideas, diseñó y realizó en 1959 el primer submarino autónomo (el platillo sumergible *SP350*), de pequeño tamaño, eficaz, manejable, capaz de alcanzar 350 metros. Puesto en funcionamiento a partir del puente de su navío de apoyo, el *Calypso*, podía ir de un lugar de inmersión a otro a la velocidad de 10 nudos.

1974 fue el año de un cambio de perspectiva. Hasta entonces, submarinos y batiscafos se sumergían al servicio de la ciencia, pero un poco al azar. La operación FAMOUS (*French American Mid Ocean Undersea Survey*) fue la primera campaña oceanográfica cuya herramienta principal era el submarino tripulado profundo. La prepararon 20 buques, a 700 kilómetros al sur de las Azores, en la dorsal medioatlántica. En 1973, el *Arquímedes*, acompañado el año siguiente por el *Alvin* y *Cyana* totalizaron 51 inmersiones, 228 horas en el fondo, 91 kilómetros recorridos en el fondo, 2 toneladas de muestras recogidas, 25 000 fotografías y cien horas de película. Actualmente, el *Alvin* y el *Cyana* han sido alcanzados entre otros por el *Nautilo* (fig. 1B), el norteamericano *Sea Cliff*, los rusos *MIR 1* y *MIR 2* y el japonés *Shinkai 6 500*. En veinte años, *Cyana* se ha sumergido 1 200 veces, y el *Nautilo* 800 veces en siete años.

El equipo científico es casi siempre internacional. Operadores y pilotos forman un pequeño club tan cerrado como el de los astronautas. Existe un único acuerdo oficial, el que asocia al IFREMER y a la US Navy y que concierne al salvamento mutuo del *Sea-Cliff* y del *Nautilo*. Todo está previsto, incluso una lista de aeropuertos donde pueden aterrizar los grandes aviones transportadores. Los remolques por carretera de los dos submarinos están aparcados en San Diego y en Tolón y se revisan regularmente. La marina francesa y el IFREMER proceden periódicamente a inmersiones de entrenamiento en los dos submarinos para perfeccionar los medios y los métodos de socorro.

Desde hace siete años, vivimos una pausa en la evolución del «submarino profundo». Como *Arquímedes* hace treinta años, el *Nautilo*, que entró en servicio en 1985, alcanza una especie de perfección. Perfección, ya que en la actualidad la calidad del equipamiento, el número y la duración de las inmersiones, la inmersión máxima (6 000 metros) relacionada sobre todo con el peso (18,5 toneladas) confieren a este *Nautilo* muy buenas bazas. Las 25,5 toneladas del *Sea Cliff* y las 26 toneladas del *Shinkai 6 500* imponen unos pórticos de mantenimiento pesados y voluminosos, instalados en costosos navíos destinados a este uso exclusivo y por tanto subutilizados. Sin embargo, se ha demostrado perfectamente que son viables submarinos de 26 toneladas y que el límite realista se sitúa en torno a las 30 toneladas.

Sesenta años después de la inmersión récord de la *Batisfera*, ¿en qué punto nos encontramos respecto al «muy profundo», el que comienza a 6 000 metros, allí donde muy pocos han ido ya, los norteamericanos para establecer el récord absoluto de 10 916 metros en la fosa de las Marianas, el 23 de enero de 1960, los franceses en 17 inmersiones frente a Japón y Puerto Rico con el *Arquímedes*? La presentación histórica nos ha permitido fijar los dos parámetros determinantes del submarino profundo de la tercera generación, el que nacerá quizás en el siglo XXI: una inmersión máxima de 11 000 metros y una masa máxima de 30 toneladas. En adelante, en este artículo, todos los razonamientos y extrapolaciones partirán del caso del *Nautilo*. ¿Se tiene que utilizar el suplemento posible de 12 toneladas para llegar a 11 000 metros? ¿Hay que «contentarse» con 6 000 metros y utilizar la masa disponible para mejorar todas las otras prestaciones del submarino, en particular el volumen de la esfera tripulada, la autonomía, la carga útil y el número y la calidad de los equipamientos? Si se consulta a los usuarios del *Nautilo* y del *Alvin*, esta necesidad, incluso a largo plazo, no parece apremiante. Corresponde desde luego a los investigadores el pronunciarse sobre este punto en respuesta a la seguridad de que más profundo y mejor equipado es totalmente factible.

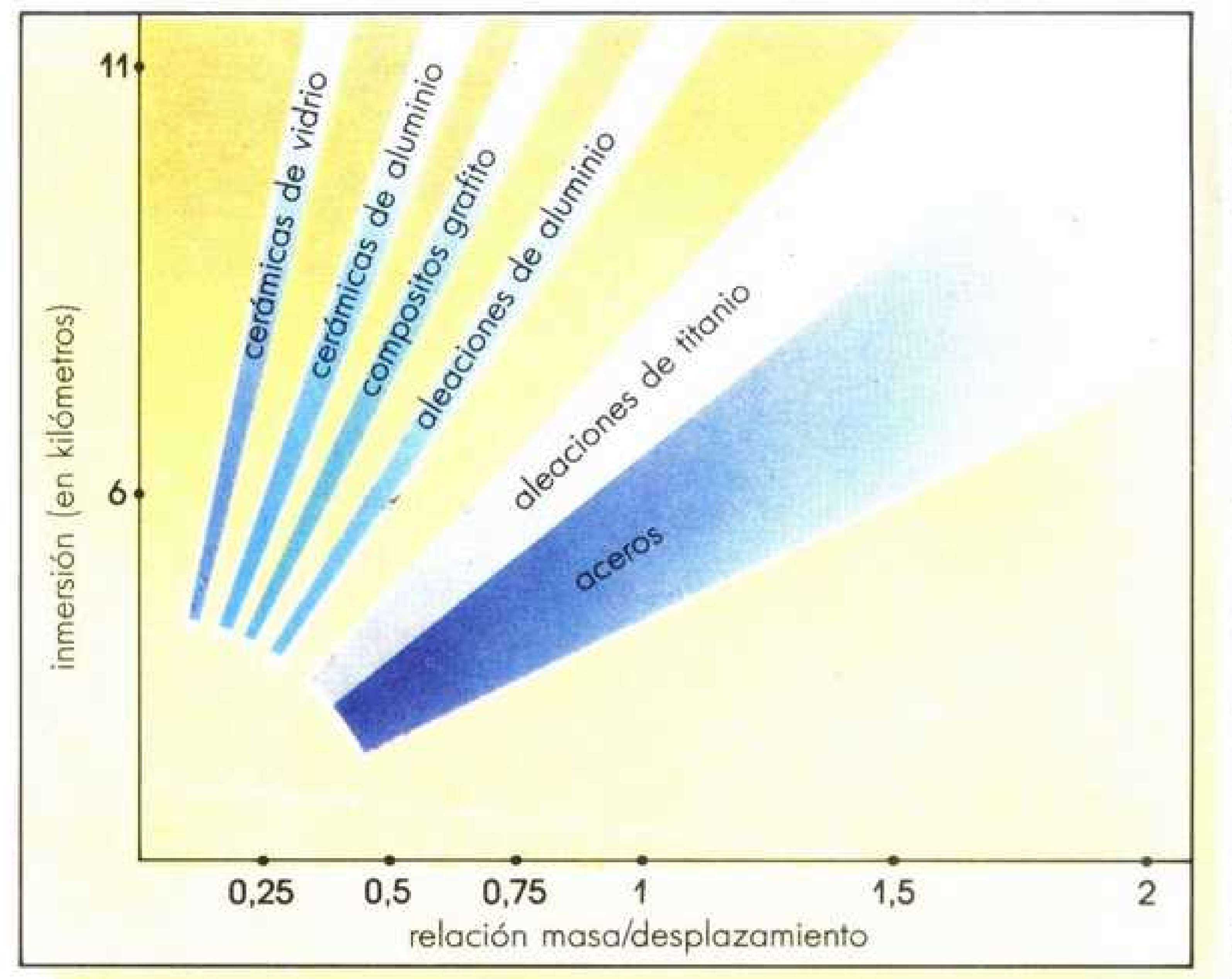


Figura 2. El material utilizado para construir la esfera también determina la flotabilidad del submarino. Su elección es esencial. El mejor material sería el que permitiese que toda la flotabilidad la proporcionase la esfera tripulada. Para que un submarino con una esfera de 8 metros cúbicos, un diámetro de 2,5 metros y una masa de 2 toneladas (relación M/D de 0,25) pueda descender a 11 000 metros, se tendría que utilizar un material composito (vidrio-resina, grafito-resina) o cerámicas de berilio, de aluminio o de vidrio.

La mar profunda es un medio hostil al hombre y a los objetos que fabrica. Se tienen que tener en cuenta la presión, la opacidad a las radiaciones electromagnéticas, la conductividad eléctrica y el poder corrosivo, la casi ausencia de oxígeno y, finalmente, el principio de Arquímedes. Proteger a los hombres y a los equipos de los efectos de la presión es la primera preocupación del ingeniero. Actualmente, los aceros y las aleaciones de titanio permiten construir recintos resistentes y estancos, generalmente esféricos. Las esferas que albergan a pilotos y pasajeros pueden estar provistas de ojos de buey de polimetacrilato de metilo, un plástico transparente muy sólido. También es necesario elaborar materiales insensibles a la

oxidación y a la corrosión electrolítica, o que estén cuidadosamente protegidos y aislados. Además, a falta de poder producir energía en el fondo, hay que almacenarla. Finalmente, los subconjuntos más densos que el agua se tienen que compensar con otros menos densos. La esfera del *Nautilo*, de aleación de titanio TA6V4, tiene una relación masa (4 550 kg) desplazamiento (es decir, su peso en el agua, 5 960 litros) (M/D) de 0,76 en una inmersión de servicio de 6 000 metros (fig. 1C). Por tanto, es menos densa que el agua y por ello participa en la flotabilidad del submarino. A la inversa, la esfera del *Arquímedes*, de acero aleado al níquel-cromo-molybdeno, con una masa de 19 toneladas y un volumen en el agua de 5 960 litros (es decir una relación M/D de 3,2 en una inmersión de servicio de 11 000 metros) es más densa que el agua de mar y se tiene que compensar (fig. 2).

¿Cómo controlar la espiral inflacionista peso-volumen? Para alcanzar 11 000 metros, con los mejores materiales clásicos, se tendrá que aumentar la relación M/D. Los volúmenes estancos, y sobre todo la esfera habitada, que tendrán una flotabilidad negativa, se tendrán que compensar con materiles de flotabilidad (véase el recuadro), cuya densidad también tendrá que aumentar para resistir las presiones crecientes. La masa crítica de treinta toneladas se alcanzará antes de la inmersión de 11 000 metros. Además, no existe el material de flotabilidad capaz de resistir unas presiones de 1 500 bars y no parece que sea objeto de estudios.

El material ideal para realizar el habitáculo sería el que, en el límite, permitiría que toda la flotabilidad necesaria la proporcionase la esfera tripulada. En el caso del *Nautilo*, esta necesidad es de 6 000 kilogramos, el 80 % de ellos proporcionados por «espumas sintácticas». Simplificando, una respuesta sería una esfera de 8 m³, de un diámetro de 2,5 metros, de una masa de dos toneladas, y con una relación M/D de 0,25. Esto elimina las aleaciones de titanio y conduce a los compositos vidrio-resina, grafito-resina y luego a las cerámicas de berilio, de aluminio y de vidrio (fig. 2). Los investigadores del laboratorio «materiales» del Naval Ocean Systems Center de la US Navy, en San Diego, han explorado estas vías desde hace diez años y han obtenido unos resultados muy prometedores con probetas cilíndrico-esféricas o esféricas que alcanzan diámetros de 50 centímetros. Para una inmersión de servicio de 11 000 metros y con un coeficiente de seguridad de 1,5 (este coeficiente es la relación entre la presión teórica que se supone resiste el recinto debido a las características mecánicas de su material y la presión de servicio), la relación M/D sería de 0,5 para las cerámicas de aluminio y de 0,33 para las cerámicas de vidrio.

Todo proyecto de submarino comporta una etapa en la que se revisa cada uno de los métodos de producción y de almacenamiento de la energía, y en la que el criterio importante es la densidad energética, es decir la cantidad de energía eléctrica almacenada por la unidad de masa, expresada en Wh/kg. Intensidad punta, duración de la recarga, periodicidad del mantenimiento, coste, necesidad o no de proteger la fuente de energía de la presión, y seguridad, constituyen otros tantos parámetros que se examinan después del establecimiento de un balance eléctrico de las inmersiones (en el caso del *Nautilo* una cincuentena de kWh).

Los reactores nucleares son demasiado caros teniendo en cuenta el desarrollo a efectuar. El motor Diesel en circuito cerrado y los motores cíclicos Stirling tienen una buena densidad energética; ¿pero, cómo almacenar o expulsar los gases de escape a 1 300 bars y garantizar una perfecta estanqueidad de la válvula de escape? Las baterías de plomo o de níquel-cadmio en equipresión con el medio ambiente, que ofrecen soluciones comprobadas, 20 a 40 Wh/kg, gravan el balance de peso, pero siguen siendo las menos caras. Las baterías plata-zinc tienen una mejor densidad energética, 70 Wh/kg, pero su coste es muy elevado. Éstas son las soluciones clásicas, a la espera de la introducción de otros pares ánodo-cátodo gracias al mercado del automóvil eléctrico: plata-hierro, níquel-hierro (30 Wh/kg), aluminio oxígeno, litio-carbono, etc. Otra vía prometedora es la de las baterías enteramente sólidas desarrolladas por M. Armand del laboratorio de iónica y de electroquímica del sólido, en la universidad de Grenoble, constituidas por un

Los submarinos profundos en cifras

FNRS II - 28 toneladas vacío - una inmersión no tripulada en octubre de 1954 a 1 380 metros. Su esfera se convirtió en la del
FNRS III - 28 toneladas vacío - 80 inmersiones entre 1953 y 1961 con un récord de 4 050 metros el 15 de febrero de 1954.
TRIESTRE I - 30 toneladas vacío - inmersión récord de 3 150 metros en 1953. Dotado de una nueva esfera, estableció el récord absoluto de inmersión a 10 916 metros el 23 de enero de 1960. Dotado de una tercera esfera se convirtió en el
TRIESTRE II en 1964 - límite a 6 000 metros y un peso en vacío de 87 toneladas.
ARQUÍMEDES - 58 toneladas vacío, ha efectuado unas 150 inmersiones entre 1961 y 1974. Calculado para 22 000 metros.

	Fecha de entrada en servicio	Inmersión máxima en metros	Peso en toneladas
ALVIN	1964	4000	17
CYANA	1970	3000	8,5
NAUTILO	1985	6000	18,5
SEA CLIFF	1985	6000	25,4
MIR I y II	1987	6000	18,5
SHINKAI 6500	1989	6500	26

LOS MATERIALES DE FLOTABILIDAD

El equilibrio de un submarino parado o que evoluciona a baja velocidad se obtiene cuando su peso es igual en módulo al empuje de Arquímedes, es decir, cuando su peso aparente en el agua es nulo.
Muchos de los elementos de un submarino tienen una masa volúmica superior a la del agua de mar, por ejemplo las baterías. Por tanto, se tienen que «compensar» con otros elementos llamados de flotabilidad, que tienen una masa volúmica inferior a la del agua de mar. Éstos aumentarán el volumen, el peso y el empuje de Arquímedes del submarino. En la fase de diseño, se miden o se calculan las masas y los volúmenes de todos los elementos del submarino y luego se compensan de forma que se establezca la igualdad empuje-peso y que el centro de gravedad y el centro de volumen (el centro de volumen es a los volúmenes lo que el centro de gravedad es a las masas) queden alineados en la misma vertical. Entonces el submarino está normalmente en equilibrio y permanece horizontal durante la inmersión. Este equilibrio es inestable. Durante la inmersión el vehículo aumenta o aligera su peso al desembarcar equipos y embarcar muestras. De una misión a otra, varía su inmersión a la vez que su empuje y la densidad del agua de mar aumentan con la presión (aproximadamente en un 5 ‰ por kilómetro).
Los batiscafos utilizan como elementos de flotabilidad lastres de chapa delgada, llenos de carburante (hexano de una densidad de 0,67 a 15 °C), que en conjunto tienen una densidad del orden de 0,8. Así, el peso en vacío del *Arquímedes* era de 58 toneladas y se necesitaban 170 000 litros de carburante para hacerlo flotar, con un desplazamiento en inmersión de 209 toneladas.
Por su parte, los submarinos de la segunda generación utilizan «espumas sintácticas», microbolas de vidrio (20 a 200 micrómetros de diámetro) sumergidas en una epoxirresina. Las mejores densidades obtenidas se sitúan en torno a 0,5 para presiones de servicio de 600 bars y de destrucción de 1 000 bars. En el caso del *Nautilo*, se utilizan en total 8 500 litros de un material de densidad 0,55. Finalmente, los recintos estancos participan generalmente en la flotabilidad del submarino.

compuesto de inserción y por un polímero de conducción iónica. Su densidad másica sería de siete a diez veces superior a la de las baterías de plomo, con un precio tres veces menor, en el caso de una producción en serie, en desarrollo por Hydro-Quebec en Canadá.

Otra vía posible: las células de combustión. Indispensables en las actividades espaciales, desde hace más de veinticinco años son objeto de pruebas para su aplicación a los submarinos en Francia y sobre todo en Estados Unidos. En este último caso, se trata de una célula de 5 m^3 y de 3,5 toneladas, que ofrece una densidad de 200 Wh/kg, y está destinada a equipar los DSRV (*Deep Submergence Rescue Vehicle*), submarinos de salvamento de la US Navy. Este tipo de células tiene una mala imagen entre los submarinistas, debido a los accidentes que tuvieron lugar hace veinticinco y diez años, en tierra y en el mar. Los programas más prometedores versan actualmente sobre pilas recargables de litio y sobre el par Li-$SOCl_2$ que, en el laboratorio, ofrece unas densidades del orden de 1 kWh/kg. Los ensayos realizados establecen su seguridad, fiabilidad y buen comportamiento bajo presión. Las produce la sociedad Altus Corporation, en California. También en este caso, no hay problemas reales cara al futuro, sino serios indicios de mejoras muy significativas que serán útiles, cualquiera que sea la inmersión.

Quince años después del establecimiento de las especificaciones operativas del *Nautilo*, establecidas extrapolando las de *Cyana*, es agradable constatar que han envejecido bien, que las opciones elegidas fueron casi siempre las buenas, que no se haría mucho mejor actualmente y que los progresos técnicos más interesantes aparecidos después se han podido tener en cuenta en los trabajos periódicos en el submarino. Se necesita un salto técnico considerable para que se llegue a alterar totalmente la concepción general del sistema. El reactor nuclear ha permitido aumentar en un factor entre cincuenta y cien la potencia disponible en los submarinos de combate. La autonomía y la velocidad así obtenidas han llevado a reconsiderar totalmente la táctica de empleo, y luego la estrategia misma. Ninguno de los progresos mencionados más arriba, y tampoco la experiencia de cinco mil inmersiones, obligan a replantear el diseño general de un submarino de investigación. Sólo un reactor nuclear permitiría realizar un verdadero navío oceanográfico submarino autónomo, capaz de acoger una tripulación importante.

La duración máxima de las inmersiones, doce horas, en la práctica nueve horas, corresponde a la fatiga de la tripulación. La automatización de algunas tareas disminuirá la fatiga y, combinada con una mejor capacidad energética, quizá permitirá «estar» quince horas pero no más, ni todos los días. Un radio de acción de quince kilómetros es un valor máximo, ya que el *Nautilo* no utiliza ordinariamente más que un tercio. La exploración a «gran velocidad» de amplias zonas corresponde a otros medios, sondeador multihaz, sónar lateral, ingenio teledirigido autónomo o con cable, todos ellos menos costosos.

Una velocidad máxima de dos nudos es compatible con la navegación observando el fondo y con la firme necesidad de poder detener el submarino a la vista de un obstáculo, en diez o quince metros. Pero aún hay que verificar que la estrechez misma de las grandes fosas no refuerce las corrientes profundas, normalmente de velocidad inferior a un nudo.

El problema nuevo de un submarino que vaya hasta 11 000 metros es la duración de los tránsitos superficie-fondo-superficie. Sin la ayuda de motores verticales, gracias a una flotabilidad negativa (sobrelastre de descenso) o positiva (evacuación del sobrelastre a la subida), el *Nautilo* alcanza una velocidad vertical de 0,8 a 0,9 m/s. La ida y la vuelta hasta 11 000 metros, a la velocidad de 1 m/s, consumiría seis horas. Estudios de las formas, aumento de los lastres de ascenso y descenso, utilización racional de los motores verticales, etc. constituyen unos elementos de solución para reducir este «tiempo perdido».

Diseñar, realizar, poner en marcha un submarino tripulado autónomo capaz de llegar a 11 000 metros con unas cualidades al menos iguales a las del *Nautilo*, que se sumerge todos los días en los que el mar no supera la fuerza 3, es factible con algunas reservas. Se tiene que disponer en particular de un material que permita realizar unos recintos estancos cuya relación masa/desplazamiento no pase de 0,5, tanto en el caso de algunos centenares de litros como de 4 a 5 metros cúbicos.

Se están realizando una decena de programas de investigación y de desarrollo en Francia, Japón y sobre todo Estados Unidos (telemanipulación asistida por ordenador, transmisión de imágenes por vía acústica, fuentes de energía, cerámicas y complejos fibras-resinas) cuyos resultados o bien son indispensables, o bien son una fuente de disminución de masa y de mantenimiento de las prestaciones. Todas estas ganancias en densidad y en masa, utilizables a 11 000 metros, también lo son evidentemente a menores profundidades. Permitirán ofrecer otra solución al submarino de la tercera generación, menos de 19 toneladas, 6 000 metros, y mayor rendimiento que el *Nautilo* en todos los aspectos.

Si se construyen en el futuro submarinos profundos será que la situación ha evolucionado. La convergencia de necesidades científicas, industriales, comerciales y militares claramente definidas habrá llevado a un país a realizarlo y a otros a seguirle los pasos para «continuar en la carrera», o bien a varios países a agruparse para realizarlo juntos. La clave de esta nueva carrera hacia las profundidades es el dominio del material del casco. Actualmente, sólo Estados Unidos se prepara abiertamente, a diferencia de los países europeos. Ingresado tarde en el movimiento, Japón juega duro desde la entrada en servicio del *Shinkai 2 000* en 1982 y del *Shinkai 6 500* en 1991. Se está desarrollando un robot en el JAMSTEC (*Japan Marine Science and Technology Center*). La puesta a punto es difícil, pero una vez resueltos los problemas de cables, dentro de algunos años, hará de Japón el único país capaz de intervenir a 10 000 metros.

Esto reavivará el debate tripulado-no tripulado, cuando el «ROV 6 000» (vehículo teledirigido a 6 000 metros) del IFREMER se pueda utilizar conjuntamente con el *Nautilo* dentro de tres años. Hasta cierto punto es un debate académico, muy pronto temperado, controlado y calmado por los problemas de coste y de eficacia y por las misteriosas relaciones entre estos dos aspectos. Si no cambia nada, la realización del *Nautilo* habrá costado el doble de lo que costará el ROV 6 000, y los costes de funcionamiento mantendrán aproximadamente la misma relación, a la vista de la importancia relativa de los equipos de preparación y de mantenimiento.

Persuadido de la complementariedad de los medios tripulados y no tripulados profundos, uno para la observación directa y la toma selectiva de muestras, y el otro para la recogida de información rutinaria y a gran escala, yo creo que la realización de un submarino 11 000 de tercera generación sólo puede venir de una amplia cooperación internacional.

PARA MÁS INFORMACIÓN:

- F. Busby, Undersea Vehicles Directory, febrero, de 1990, Arlington VA 22 203 (USA).
- G. Houot, *Vingt ans de bathyscaphe*, B. Arthaud Editeur, 1971.
- P. Willm y G. Houot, *Le bathyscaphe à 4050 au fond des océans*, Editions de Paris, 1954.
- G. Boisrayon, *Le sous-marin SM 97 - Nautile*, Bulletin de l'ATMA, session 1985, 47, rue de Monceau, 75008 Paris.
- J.D. Stachiw, *Pressure resistant ceramic housings for deep submergence unmanned vehicles*, MTS Journal, junio, 1990, 1825 K. Street NY, Washington DC (USA).

LOS PECES DE LAS GRANDES PROFUNDIDADES

PESE A SER MAL CONOCIDOS, LOS PECES QUE VIVEN EN LO MÁS PROFUNDO DE LOS OCÉANOS YA SON OBJETO DE INTERÉS PESQUERO. SE HAN PUESTO EN MARCHA PROGRAMAS DE INVESTIGACIÓN PARA ESTUDIAR LA BIOLOGÍA Y EL PAPEL ECOLÓGICO DE ESTA FAUNA, DE LA QUE DESCUBRIMOS AQUÍ LAS NOTABLES ADAPTACIONES A LAS CONDICIONES EXTREMAS DE LAS ZONAS ABISALES.

PATRICK GEISTDOERFER

A doscientos o trescientos metros por debajo de la superficie de los océanos empieza un mundo oscuro y frío, desconocido durante mucho tiempo e inquietante, que alcanza profundidades de más de diez mil metros en las grandes fosas oceánicas. Durante siglos, pareció imposible que este medio, tan hostil para el hombre, pudiera albergar la menor criatura viviente. Las grandes expediciones oceanográficas de fines del siglo XIX demostraron precisamente lo contrario: a todas las profundidades de los mares y los océanos viven animales, incluso de los más evolucionados, los vertebrados. Las especies de peces que se encuentran en las grandes profundidades son absolutamente características de dicho medio. Como veremos en este artículo, presentan notables adaptaciones a las condiciones de vida extremas que caracterizan las zonas abisales.

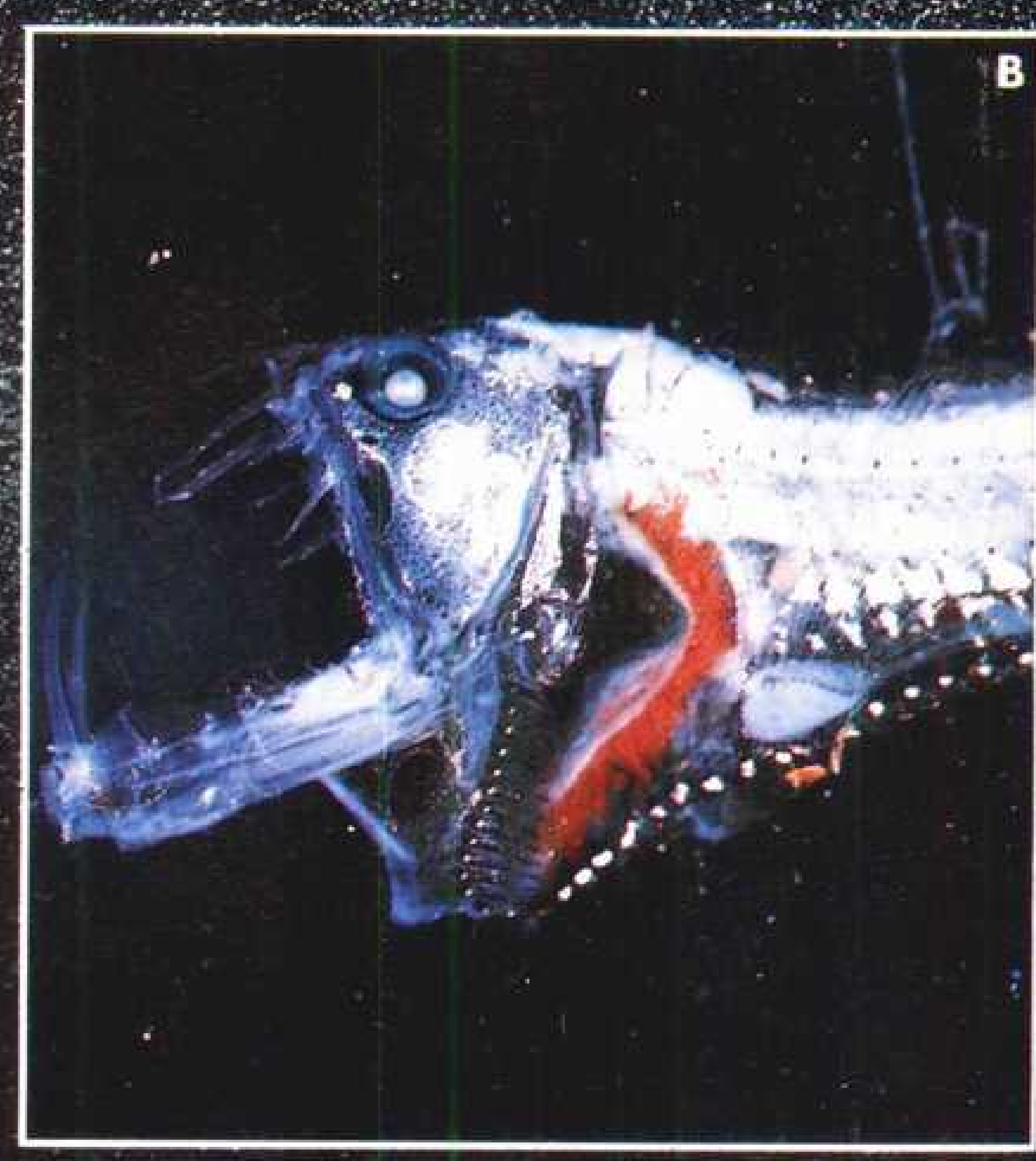
En el fondo del mar, el agua no está inmóvil: además de las corrientes de marea, hay una circulación horizontal cuyas corrientes alcanzan velocidades de varios hectómetros por hora y, en determinados lugares, una circulación vertical. La temperatura decrece con la profundidad y se estabiliza en unos 2 °C más allá de mil o dos mil metros. Al frío se añaden las presiones considerables (100 atmósferas bajo 1 000 m de agua). Por último, el límite de penetración de la luz solar está a setecientos u ochocientos metros; a partir de allí reina la oscuridad y, en consecuencia, desaparece el plancton vegetal.

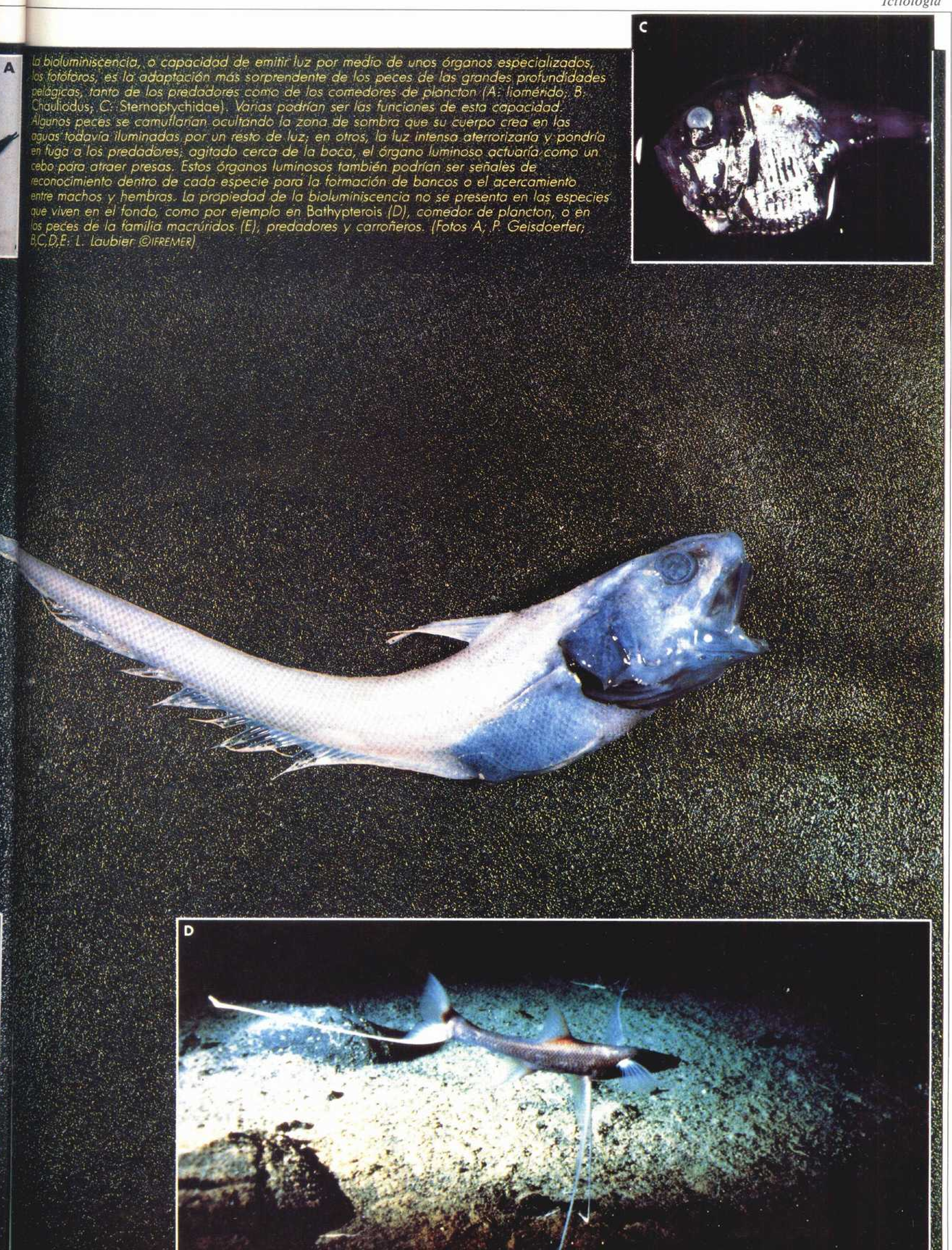
En ausencia de organismos clorofílicos, ¿cuál es el origen de la materia orgánica? Exceptuando las comunidades asociadas al hidrotermalismo submarino las grandes profundidades deben la renovación de su materia orgánica a la producción primaria de las aguas superficiales: caída de partículas orgánicas, cadáveres, restos vegetales y animales, excrementos y migraciones verticales de animales pelágicos (crustáceos, peces, etc.). Esta «lluvia» de materia orgánica todavía está mal cuantificada, pero se sabe que su masa (y por lo tanto la cantidad de materia viviente) disminuye muy deprisa con la profundidad: a mil metros, esta cantidad es la décima parte de la que hay en la superficie, a cinco mil metros, la centésima parte, y a ocho mil metros, la milésima. La escasez de alimento, por tanto, es otra característica de este medio profundo.

Los peces de las profundidades tienen un régimen alimentario adaptado a los recursos disponibles: todos son carnívoros o detritívoros. Presentan, además, un conjunto de adaptaciones morfológicas que difieren según que el animal nade en plena agua (especie pelágica) o que viva en el fondo (especie béntica).

Las especies pelágicas suelen ser pequeñas, de unos pocos centímetros de longitud y eventualmente decenas de centímetros en las especies mayores, y son de color negro u oscuras. La mayoría de las especies más pequeñas (mictófidos, estomiátidos, esternoptíquidos) consumen el plancton animal profundo (principalmente pequeños crustáceos). Otras (*Chauliodus*, lioméridos), generalmente de más de veinte centímetros, capturan presas «grandes»: camarones, calamares pequeños, pequeños peces pelágicos. Estas especies predadoras poseen una potente dentición, con grandes dientes puntiagudos en forma de dagas implantados







La bioluminiscencia, o capacidad de emitir luz por medio de unos órganos especializados, los fotóforos, es la adaptación más sorprendente de los peces de las grandes profundidades pelágicas, tanto de los predadores como de los comedores de plancton (A: liomérido; B: Chauliodus; C: Sternoptychidae). Varias podrían ser las funciones de esta capacidad. Algunos peces se camuflarían ocultando la zona de sombra que su cuerpo crea en las aguas todavía iluminadas por un resto de luz; en otros, la luz intensa aterrorizaría y pondría en fuga a los predadores; agitado cerca de la boca, el órgano luminoso actuaría como un cebo para atraer presas. Estos órganos luminosos también podrían ser señales de reconocimiento dentro de cada especie para la formación de bancos o el acercamiento entre machos y hembras. La propiedad de la bioluminiscencia no se presenta en las especies que viven en el fondo, como por ejemplo en Bathypterois (D), comedor de plancton, o en los peces de la familia macrúridos (E), predadores y carroñeros. (Fotos A, P. Geisdoerfer; B,C,D,E: L. Laubier ©IFREMER)

PATRICK GEISTDOERFER es director de investigación en el CNRS. Gran parte de sus investigaciones versan sobre los peces de las grandes profundidades. Ha efectuado numerosas campañas oceanográficas en todos los océanos del mundo, así como inmersiones en sumergibles franceses, norteamericanos y japoneses. Es profesor de oceanografía en la Escuela naval cercana a Brest, donde dirige el departamento de medio ambiente y el laboratorio de oceanografía. También trabaja en el laboratorio de ictiología del Museuo nacional de historia natural de París.

en unas mandíbulas muy desarrolladas que les dan un aspecto terrorífico. Esta hipertrofia de las mandíbulas puede considerarse como una adaptación a un medio pobre en alimento.

Puede haber diferencias significativas entre especies vecinas según la profundidad a la que viven.[1] Así, una especie batipelágica, que viva a pocos miles de metros de profundidad, tiene un tamaño menor y una organización más simplificada que otra próxima, mesopelágica, que viva a mayor altura, a unos cientos de metros de profundidad tan sólo. La única estructura que siempre está bien desarrollada es la mandíbula. Estas modificaciones permiten una reducción de los gastos energéticos. En ciertos peces, los liómeridos, la simplificación está llevada al máximo: falta de escamas, de aletas y de cintura pélvica, de aleta caudal, considerable reducción de los ojos, y cráneo parcialmente cartilaginoso.

Una característica de los peces pelágicos profundos y de muchos invertebrados[2] es la bioluminiscencia. Las tres cuartas partes de las especies de peces emiten luz por medio de unos órganos especializados, los fotóforos (véase la figura). Aunque su significado y su papel no están del todo aclarados, la bioluminiscencia constituye un carácter adaptativo a la oscuridad de las profundidades. En numerosos peces mesopelágicos, los fotóforos están dispuestos en líneas ventrales paralelas. Estos órganos podrían desempeñar una función de camuflaje: disimularían la zona de sombra que crea su cuerpo enmascarando los rayos solares que penetran en el mar y que podrían revelar su presencia a eventuales predadores. Las longitudes de onda emitidas por dichos peces, situadas en el azul-verde (entre 450 y 510 nm), corresponden a las del residuo submarino de luz diurna en las profundidades en las que viven. Además, existe una buena correlación entre dichas longitudes de onda y las que son percibidas por sus pigmentos retinianos.

Cabe atribuir otra función a los pequeños órganos luminosos dorsales, laterales o situados en las aletas de numerosas especies mesopelágicas y batipelágicas, que, por el contrario, hacen que la silueta del pez sea bien visible. Una hipótesis estriba en suponer que esta iluminación «intensiva», a la inversa, espantaría a eventuales predadores.

En ciertos casos, los órganos luminosos podrían favorecer la captura de presas. Ciertas especies batipelágicas y abisopelágicas (que viven más allá de los tres mil metros de profundidad) llevan fotóforos en los barbillones situados debajo del mentón (*Stomias*, *Melanostomias*) o en el extremo de un radio muy alargado de la aleta dorsal (*Chauliodus*, *Ceratodus*). Estos órganos luminosos actúan como cebos que el pez agita delante de su boca para atraer las presas (peces pequeños, crustáceos...). Se ha observado incluso un estomiátido que ilumina las aguas circundantes hasta varios centímetros de distancia mediante un órgano luminoso situado cerca del ojo que actúa a modo de proyector.

Los órganos luminosos deben de intervenir también como señal de reconocimiento dentro de cada especie. Estos órganos permitirían la formación de bancos y sobre todo el acercamiento entre sexos en el momento de la reproducción. En efecto, el número y la disposición de los órganos luminosos en el cuerpo son característicos de cada especie y difieren de un sexo a otro en ciertas especies (por ejemplo, en la familia mictófidos).

OTROS PECES, OTRAS COSTUMBRES

Cerca del fondo, y en los pocos metros que lo dominan, viven unas familias de peces totalmente distintas de las que nadan en la columna de agua. Estos peces poseen a veces órganos luminosos (algunos macrúridos), que sin embargo son escasos y ventrales, por lo que han de jugar sólo un papel de identificación dentro de cada especie. Estos peces que viven en el fondo son de mayor tamaño que los que lo hacen en el agua: sus dimensiones están comprendidas entre decenas de centímetros y más de un metro. Unos, los peces bénticos, se mueven cerca de la superficie de los sedimentos y se alimentan de pequeños invertebrados que viven en la superficie o en el interior de los sedimentos. Otros, los peces bentopelágicos, nadan cerca del fondo y por encima de él. Constituyen las tres cuartas partes de los peces de grandes profundidades y pertenecen sobre todo a las familias macrúridos (más de trescientas especies) y móridos. Se alimentan tanto de animales que viven en el fondo como de animales pelágicos —peces pequeños, calamares, camarones y plancton—. No obstante, la biomasa de estos peces es muy superior a la que puede soportar la comunidad de invertebrados. Esta anomalía ecológica, puesta de manifiesto en el Atlántico norte,[3] se ha conseguido explicar gracias a las observaciones realizados durante los diez últimos años mediante cámaras sumergidas por distintos equipos. Estas observaciones han permitido averiguar que estos peces carnívoros también son necrófagos; consumiendo cadáveres de peces o de invertebrados consiguen el exceso de alimentos necesarios para sus necesidades.[4,5,6] Esta diversificación de las fuentes de alimentación es una adaptación a un medio en el que éstas son poco abundantes.

A fines de los años 1970, se descubrió el hidrotermalismo oceánico en el eje de las dorsales medioceánicas y en las comunidades quimiosintéticas asociadas. Los peces siguen estando presentes cerca de las fuentes hidrotermales activas; como los demás animales de estas comunidades, tienen una débil diversidad y un alto grado de endemismo.

Se conocen en las dorsales del océano Pacífico cuatro especies, hasta ahora desconocidas, pertenecientes a cuatro familias distintas, que fueron capturadas durante expediciones norteamericanas y francesas entre 1982 y 1992[8,9,10] (*Thermarces cerberus, Thermobiotes mytilogeiton, Bythites hollisi, Careproctus sp.*). En la dorsal del Pacífico oriental, *Thermarces* forma poblaciones abundantes (varios cientos de individuos) en torno a cada fuente hidrotermal. Se han observado también cuatro o cinco especies en la dorsal medioatlántica.[11] Dichos peces presentan adaptaciones fisiológicas y metabólicas (todavía mal conocidas) que les permiten vivir en este medio hostil, rico en sulfuros, creado por los fluidos hidrotermales. Se trata de especies carnívoras situadas en el vértice de la red trófica de la comunidad hidrotermal.

Muchos aspectos de la biología de los peces de las grandes profundidades son todavía mal conocidos: metabolismo, ciclo sexual y reproducción, crecimiento, etc. El mejor conocimiento de estos animales constituye pues uno de los objetivos de las actuales campañas oceanográficas. Al interés que para el conocimiento fundamental presenta el estudio de esta ictiofauna profunda se añade la necesidad de comprender el papel, muy importante, que ésta desempeña en las transferencias de energía entre la superficie y el fondo. Están en marcha grandes programas internacionales de investigación, como el JGOFS (*Joint Global Ocean Flux Study*),[2] para evaluar el flujo de carbono orgánico y establecer modelos matemáticos. El mejor conocimiento de este medio profundo y de su fauna es tanto más imperativo cuanto que ciertas especies de peces (granaderos, emperadores...), que viven en bancos importantes entre quinientos y dos mil metros de profundidad, son objeto de interés pesquero: ello se explica por el agotamiento de los recursos tradicionales sobreexplotados. No obstante, la explotación de reservas de crecimiento lento, debería hacerse precediéndola de estudios científicos, y con gran prudencia, so pena de provocar su rápida extinción.■

PARA MÁS INFORMACIÓN:

- B.T. Hargrave, «Ecology of deep-water zones» *in* R.S.K. Barnes y K.H. Mann (eds.), *Fundamentals of aquatic ecology*, Blackarll Sci. Publ., 2ª ed., 1991.
- N.B. Marshall, *Developments in deep-sea biology*, Blandford Press Publ., 1979.

(1) N.B. Marshall, *Developments in deep-sea biology*, Blandford Press Publ., 1979.
(2) P.J. Herring, *Bio. Chemilum.*, *1*, 147, 1988.
(3) R.L. Rowe y G.T. Haedrich, *Nature*, *269*, 141, 1977.
(4) M.L. Mahaut, P. Geistdoerfer y M. Sibuet, *Progr. Oceanogr.* *24*, 125, 1990.
(5) I.G. Priede *et al.*, *Deep-Sea Res.*, *37*, 81, 1990.
(6) R.L. Haedrich y N.R. Merrett, *in Deep-sea food chains and the global carbon cycle*, G.T. Rowe y V. Pariente (eds.), Kluwer Academic Publ., 1992.
(7) R.H. Rosenblatt y D.M. Cohen, *Trans. San Diego Soc., Nat. Hist.*, *21*, 71, 1986.
(8) P. Geistdoerfer, *Bull. Mus. Nat. Hist.*, *8*, 969, 1986.
(9) P. Geistdoerfer, *Oceanol. Acta*, *NS*, 125, 1988.
(10) P. Geistdoerfer, *C.R. Acad. Sci. Paris*, *312*, 91, 1991.
(11) Sobre la cual se desarrolló una campaña franconorteamericana de inmersiones (con el sumergible norteamericano *Alvin*, en zonas hidrotermales, con la participación de investigadores franceses del CNRS, del INSU (Instituto nacional de ciencias del Universo) y del IFREMER, así como investigadores norteamericanos.
(12) del cual existe una rama francesa bajo la responsabilidad del INSU.



MUNDO CIENTIFICO
LA RECHERCHE. versión en castellano
ÍNDICE ANALÍTICO 1990
EL FUTURO DEL PROGRAMA ESPACIAL SOVIÉTICO
CÁNCER Y ALIMENTACIÓN
EL NAZISMO Y LA CIENCIA
N.º 33
LA TRADUCCIÓN AUTOMÁTICA,
por Makoto Nagao.
LA CIRUGÍA CARDIACA,
por Daniel Loisance.
EL HÁBITAT CÉLTICO,
por Olivier Büchsenschütz.
LOS MATERIALES
INCONMENSURABLES,
por Jacques Villain.
EMILIO DEL VILLAR Y EL PRI
MAPA DE SUELOS DE LA
PENÍNSULA LUSO IBÉRIC
por Jordi Martí Hennebe
Nº 109
LA RESPIRACIÓN DE LOS ARÁCNIDOS,
por Rüdiger Paul.
LOS POLÍMEROS TERMOESTABLES,
por Bernard Sillion y Guy Rabilloud.
LA CRISTALOGRAFÍA BIOLÓGICA,
por Roger Fourme y Joël Janin.
UNA NUEVA ESTRATEGIA PARA EL PLUTONIO,
por Jean-Paul Schapira.
Nº 113
LA ACÚSTICA DEL GONG
por Thomas D. Rossing
EL PLEGAMIENTO DE LAS PROTEÍNAS
por Thomas E. Creighton
EL TÉCNICO INVISIBLE
por Steven Shapin
LA EQUINOCOCOSIS, ENFERMEDAD PARASTARIA
por P. Delattre, P. Giraudoux y M. Pascal
EL FUTURO DEL PROGRAMA ESPACIAL SOVIÉTICO
por Constantin Gringaouz
Nº 110
LA OLFACCIÓN Y EL DESARROLLO DEL NIÑO,
por Benoît Schaal y Richard H. Porter.
LAS SUPERREDES MAGNÉTICAS,
por Albert Fert, Jean-Pierre Renard, Patrick Etienne, Fréderic Nguyen-Van Dau y Gérard Creuzet.
EL FONDO DIFUSO COSMOLÓGICO,
por Nicola Vittorio y Marc Lachièze-Rey.
EL DESTINO DE LAS CÉLULAS EN EL EMBRIÓN,
por Richard L. Gardner.
NO ESPERE MÁS
PARA COMPLETAR SU COLECCIÓN
OFERTA ESPECIAL
SOLAMENTE VÁLIDA PARA ESPAÑA
5 NÚMEROS POR SÓLO 1500 PTS.


MUNDO CIENTÍFICO
LA RECHERCHE versión en castellano
DOSSIER: LA FECUNDACIÓN IN VITRO
EL TRATAMIENTO DEL INFARTO DE MIOCARDIO
LOS CRISTALES DEL FUTURO
LA ESTRUCTURA DEL SOL
LA ECOLOGÍA DE LOS MANGLARES
Nº 114
EL TRATAMIENTO DEL INFARTO
DE MIOCARDIO, Wert.
DE MIOCARDIO de FUTURO,
por Frans Van DEL Lerbel.
LOS CRISTALES y François SOL,
por Bernard Buffat y DEL Bethomieu,
LA ESTRUCTURA Daniel Vignaud.
por Gabrielle y Dagía DE
Michel Cassé y LA ECOLOGÍA RES,
LOS MANGLARES
por François Blasco.
MUNDO CIENTÍFICO
ÍNDICE ANALÍTICO 1991
LA RECHERCHE versión en castellano
LA PERCEPCIÓN DE LA GRAVEDAD
LA TEORÍA CELULAR
LA ELECTRÓNICA DEL MAÑANA
LA SISMOLOGÍA DE LAS ESTRELLAS
MUNDO CIENTÍFICO
LA SELVA TROPICAL
LA RECHERCHE versión en castellano
LOS INDUSTRIALES «VERDES»
LA REFLECTIVIDAD DE LOS RAYOS X
LA RADIACTIVIDAD DE LAS ESTRELLAS
LAS NEURONAS DE LA RAZÓN
Nº 117
SIDA: EL ORIGEN DE UNA EPIDEMIA
por H. Rübsamen-Waigmann,
U. Dietrich, M. Grmek y O. Dargouge
LOS PÚLSARES ULTRARRÁPIDOS
por Anthony W. Jones
y Jean-Marc Bonet-Bidaud
LA RESISTENCIA DE LOS INSECTOS
por Marylène Poirié
y Nicole Pasteur
LA FÍSICA DE LA SEDIMENTACIÓN
por Robert Blanc
y Etienne Guyon
EL ARTE PREHISTÓRICO
por Steven Mithen
MUNDO CIENTÍFICO
LOS ROBOTS EN MINIATURA
LA RECHERCHE versión en castellano
LOS PÚLSARES ULTRARRÁPIDOS
LA RESISTENCIA DE LOS INSECTOS
LA FÍSICA DE LA SEDIMENTACIÓN
EL ARTE PREHISTÓRICO
SIDA EL ORIGEN DE UNA EPIDEMIA
Nº 108
¿QUIÉN ES QUIÉN EN CIENCIAS DE LA VIDA EN ESPAÑA?,
por Ángel Pestaña.
EL CAOS DETERMINISTA,
por Hermann Haken
y Arne Wunderlin.
¿CÓMO EVALUAR EL COSTE DEL RIESGO NUCLEAR?,
por Michel Damian
y Dominique Finon.
EL ORDENADOR CULTIVA SU JARDÍN,
por Ana Gerschenfeld.
Nº 120
LA PERCEPCIÓN DE LA GRAVEDAD,
por Laurence Schaffar y Alain Esterle.
LA TEORÍA CELULAR,
por François Duchesneau.
LA ELECTRÓNICA DEL MAÑANA,
por Claude Weisbuch,
Steven Beaumont,
Clivia Sotomayor-Torrès,
Joerg Kotthaus, Kees Harmans,
Peter van Daele,
John Williamson y Fernando Briones.
Nº 127
LOS INDUSTRIALES VERDES,
por Dominique Chouchan.
LA REFLECTIVIDAD DE LOS RAYOS X,
por Jean-Jacques Benattar.
LA RADIACTIVIDAD DE LAS ESTRELLAS,
por Nicolas Prantzos.
MUNDO CIENTÍFICO
La fecundación in vitro en cuestión
LA RECHERCHE versión en castellano
La vida en Marte
El caos determinista
El manto interfiere la Tierra
La fusión fría
BOLETÍN DE PEDIDO
Nombre
Domicilio
Población C.P. Provincia
Deseo que me envíen los siguientes cinco números de Mundo Científico:
Con esta oferta pueden solicitar cualquier número de la revista desde el nº 1 al actual, (agotados los siguientes: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 19, 20, 21, 27, 31, 36, 38, 43, 50, 53, 57, 60, 67, 71, 72, 73, 96 Y 104) al precio de oferta de 1 500 ptas. cuyo deseo efectuar mediante:
Talón adjunto por 1 500 ptas.
Contrarrembolso (más 300 ptas. por gastsos de envío).
Copie o recorte este cupón y envíelo a:
Editorial Fontalba, S.A. Valencia 359, 6º 1ª - 08009 Barcelona

EL CÁNCER ¿UN PROBLEMA DE COMUNICACIÓN?

LA DESAPARICIÓN DE COMUNICACIONES DIRECTAS ENTRE CÉLULAS ES, QUIZÁS, UN FACTOR CLAVE DE LA CANCEROGÉNESIS

En lo que a cáncer se refiere, las investigaciones fundamentales se centran, ante todo, en el estudio de las alteraciones del genoma que acompañan la aparición de los tumores. Por otra parte, este enfoque, consecuencia de los progresos recientes de la biología molecular, ha dado sus frutos a partir del descubrimiento de los oncogenes, estos genes cuya activación excesiva se relaciona con la aparición de ciertos tipos de cáncer. Sin embargo, el estudio del mecanismo de formación de los tumores no puede limitarse solamente al genoma, sino que se ha de plantear también a escala de la sociedad celular en su conjunto. Así, algunos resultados recientes obtenidos en parte en nuestro laboratorio del Centro internacional de investigación sobre el cáncer, de Lyon, indican que el cáncer podría ser una enfermedad de la comunicación entre células.[1]

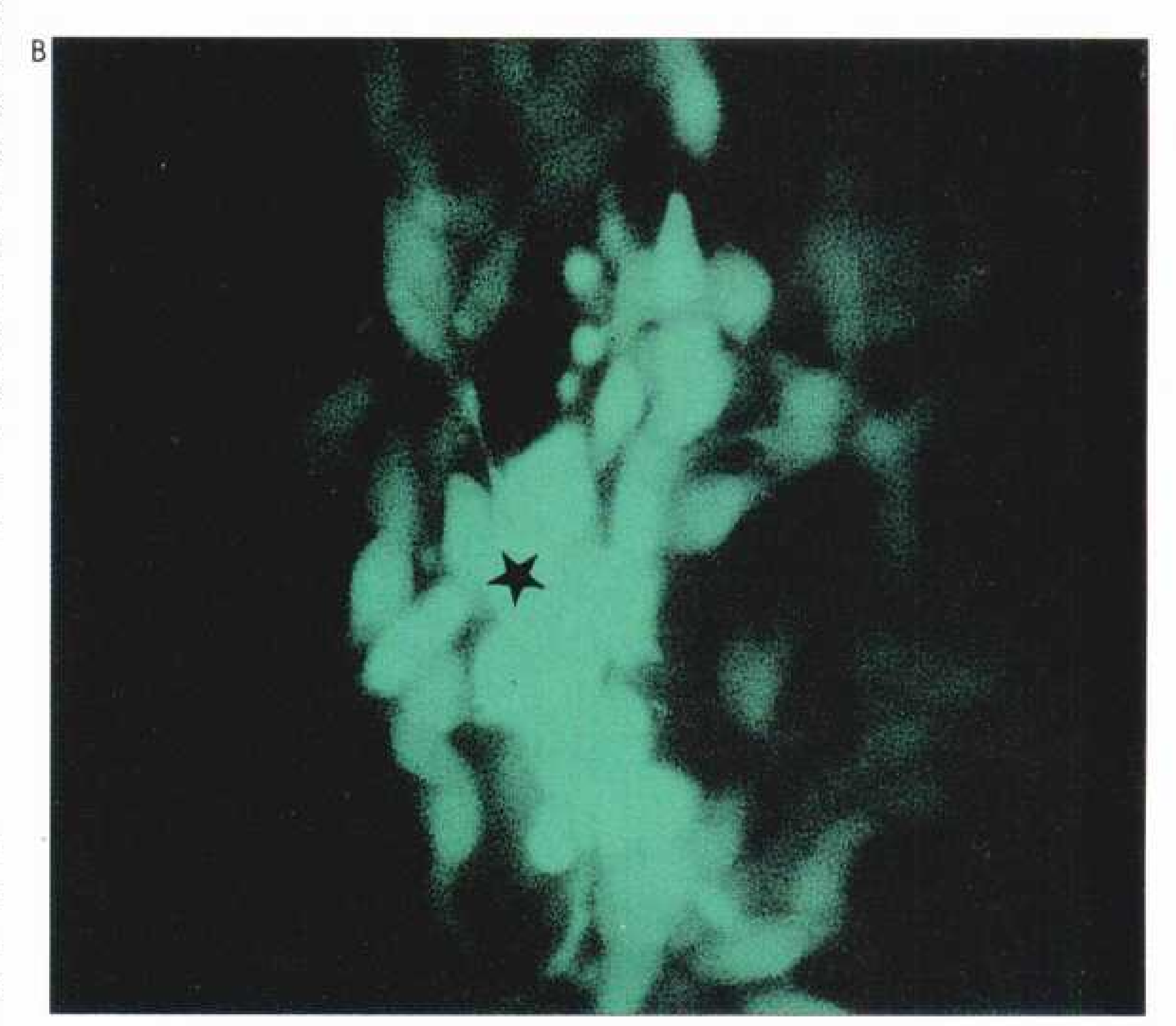
EN LOS TEJIDOS, UNA PROLIFERACIÓN CELULAR BAJO FUERTE VIGILANCIA

En condiciones normales, en el organismo adulto, la proliferación de las células es un proceso rigurosamente controlado, que permite solamente la reparación de ciertos tejidos (cicatrización) o su renovación. En el caso de la piel, por ejemplo, la sustitución de las células muertas se efectúa gracias a la multiplicación de células madre que muy pronto adquieren las características de las células maduras de la epidermis (se dice que se diferencian) y pierden su capacidad para dividirse.

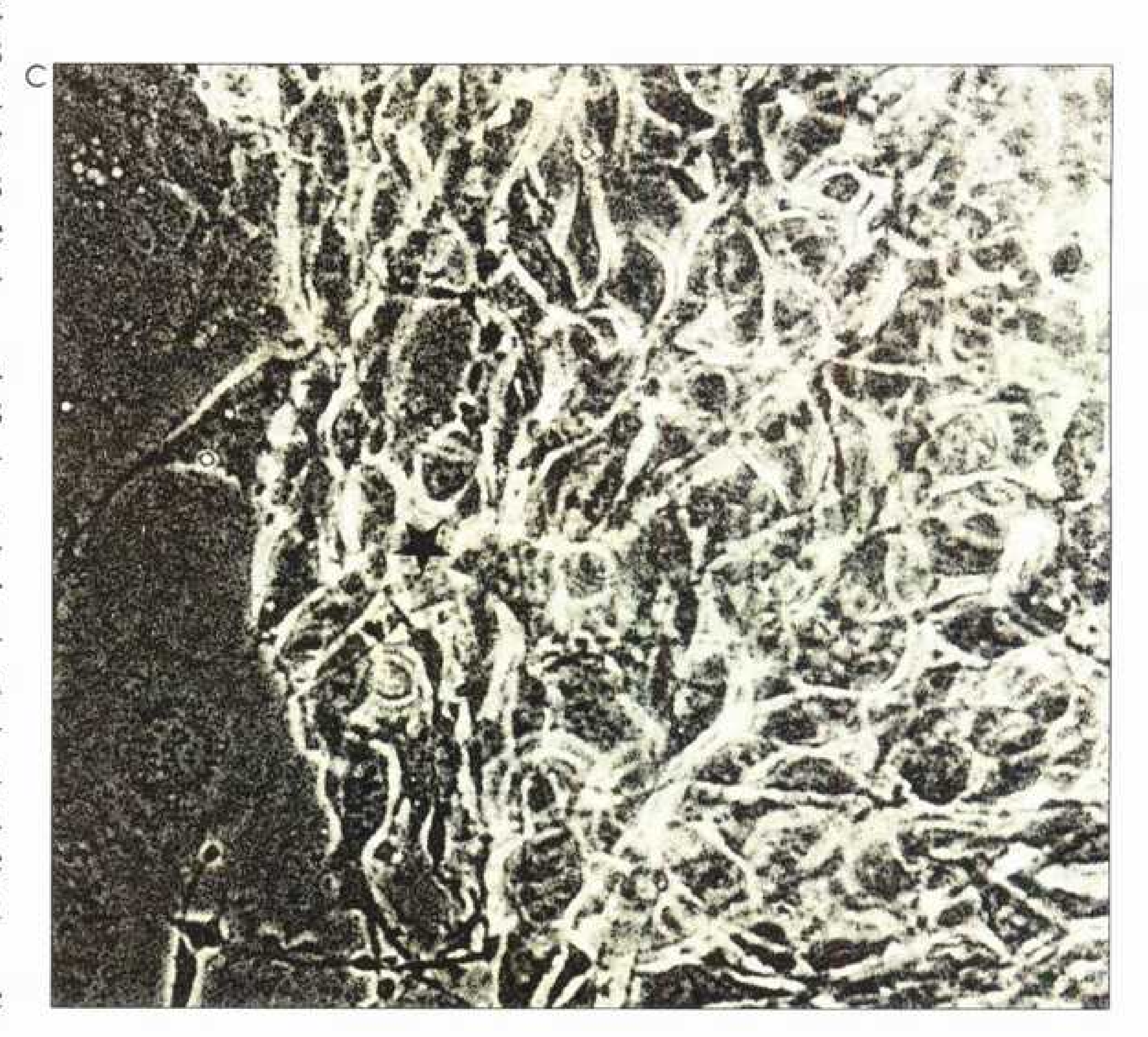
Esta estabilidad del tejido es regulada por interacciones muy estrechas entre las células. Ahora bien, en el caso del cáncer, dicha estabilidad, u «homeostasis», se rompe: la proliferación celular que desemboca en la formación de un tumor no va acompañada de un proceso de diferenciación compatible con la función del tejido original. Por tanto, es importante comprender lo que hace que en un momento dado una célula no responda ya a las necesidades del órgano y que se multiplique sin cesar hasta generar un tumor.

En un tejido, las células son capaces de comunicarse directamente gracias a un intercambio directo de su contenido, el citoplasma. Este intercambio permite compartir ciertas moléculas necesarias para la vida celular (azúcares, nucleótidos, ami-

B



C



Algunas comunicaciones directas permiten a las células de un mismo tejido intercambiar una parte de su contenido. Estos intercambios se hacen a nivel de unos enlaces, llamados «comunicantes», que forman poros a través de las membranas de las células (A). Cada poro está constituido por seis proteínas unidas, las conexinas. En los cultivos in vitro *(fotos B y C), puede apreciarse la falta de comunicación entre las células malignas (aquí, células embrionarias de ratón tratadas con un cancerígeno) y las células sanas. La comunicación se comprueba mediante la inyección de un colorantes fluorescente, visible a la luz ultravioleta (B). Inyectado en una de las células malignas, el colorante se extiende a las otras células del foco (derecha de la foto), pero no a las células sanas contiguas. En la foto C, obtenida con contraste de fase, se distinguen claramente las células normales, de aspecto estrellado, y el foco maligno. La desaparición de los enlaces comunicantes entre células sanas y células cancerosas podría ser un factor clave de la carcinogénesis. (Fotos autores.)*



noácidos, iones) o, incluso, la propagación de un mensaje a partir de la periferia de un tejido. Este tipo de comunicación directa entre células próximas corre a cargo de unos enlaces especiales, llamados enlaces comunicantes o de tipo «gap». A su nivel, las membranas de las dos células que están en contacto son atravesadas por un canal, el conexón (fig. A), cuyas paredes están compuestas por una proteína llamada conexina. Los dos canales, frente a frente, controlan un poro que permite el paso de pequeñas moléculas de un peso molecular inferior a mil daltons, pero no así el de moléculas mayores, como las proteínas. Los enlaces comunicantes abundan en la mayoría de nuestros tejidos, con excepción, sin embargo, de ciertas células musculares y nerviosas, y de las células sanguíneas.

Al permitir una intensa interacción entre las células de un mismo tejido, los enlaces comunicantes son un factor importante en el mantenimiento de la estabilidad tisular. En el animal, se ha conseguido una prueba espectacular al estudiar la regeneración del hígado. O. Traub y sus colaboradores, de la universidad de Essen en Alemania, observaron, en 1989, que cuando a un ratón se le sustrae una parte de hígado, la reconstrucción del órgano por proliferación celular va acompañada de una suspensión transitoria de la síntesis de conexina en las células.[2]

¿Cómo probar el papel de los enlaces comunicantes en la carcinogénesis? Hay una manera sencilla de apreciar, en un grupo de células en cultivo, la importancia de los enlaces comunicantes presentes en un momento dado. Para ello, se practica una microinyección intracelular de un colorante fluorescente capaz, por su pequeño tamaño, de pasar a través de los poros de los enlaces. La difusión del colorante en las células circundantes permite, contando simplemente las células que han pasado a ser fluorescentes, determinar la capacidad de comunicación de las células.

Gracias a esta técnica de rutina, ha sido posible comprobar la acción sobre los enlaces comunicantes de muchos compuestos promotores de tumores. Estas sustancias son en sí mismas incapaces de inducir la formación de un tumor en el animal, pero su adición suele ser necesaria en un tratamiento genotóxico (que altera el genoma) para que aparezca un tumor. Uno de los promotores de tumor más utilizado es el TPA (tetradecanoyl-12, 13-forbol acetato), un éster de forbol empleado para inducir tumores de la piel en el ratón.

En 1979, los dos equipos de A.W. Murray, de Bedford Park, en Australia, y de J.E. Trosko, de la universidad del Estado de Michigan, en Estados Unidos, demostraron de este modo y simultáneamente que, si se tratan *in vitro* células de roedor con TPA a dosis no tóxicas, las comunicaciones a través de los enlaces se reducen.[3,4] Esto sugería que una inhibición de estas comunicaciones mediante sustancias cancerígenas favorecería el aislamiento de las células precancerosas. Privadas de una regulación de crecimiento procedente de las células normales contiguas, estas células precancerosas se verían libres para multiplicarse y formar un tumor.

El papel importante, en la expansión de un tumor, de los enlaces comunicantes entre células tumorales y células normales contiguas ha sido confirmado varias veces *in vitro*. En un cultivo de células de ratón tratadas con un cancerígeno químico y luego con un promotor de tumor, o bien con la introducción de un oncógeno, ciertas células se multiplican de manera anárquica, formando entonces unos focos de células malignas (análogas a las células tumorales). Se obtiene de este modo una réplica del proceso de la carcinogénesis, realizable *in vitro* en sólo algunos días.

Cuando, en 1980, nuestro equipo efectuó experimentos de este tipo, pudimos observar la desaparición de las comunicaciones entre las células malignas y las células normales contiguas (fig. B y C).[5,6] Muy pronto, en 1991, estos resultados se vieron confirmados en tumores de hígado por V. Krutovskikh y sus colegas en nuestro laboratorio.[7] De una manera general, la mayoría de las células cancerosas presentan aberraciones de comunicación, especialmente las células epiteliales, origen del 80 % de los cánceres del adulto (todos los carcinomas).

Hace cinco años, con el mismo modelo de carcinogénesis *in vitro* ya mencionado, demostramos que el tratamiento de los cultivos con sustancias capaces de restablecer los enlaces comunicantes entre las células malignas y las normales circundantes (AMP cíclico, ácido retinoico, dexametasona) provocaba la supresión del carácter maligno.[8]

El equipo de W.R. Loewenstein, de la universidad de Miami, obtuvo, en 1986, unos resultados similares, con la única diferencia de que, en su modelo, las células malignas perdieron totalmente la capacidad de comunicación, debido a la suspensión de la síntesis de la conexina original.[9] El restablecimiento de las comunicaciones mediante la incorporación del gen que codifica la conexina normalmente sintetizada motivó la desaparición del carácter maligno.[10] Así, pues, estas observaciones parecían confirmar la hipótesis de que los enlaces comunicantes entre los dos tipos celulares inhiben el comportamiento canceroso. Por otra parte, esto recuerda antiguas observaciones hechas en 1982 por el grupo de E.J. Standbridge, de la universidad de California, en Irvine. Fusionando células cancerosas humanas, procedentes de cáncer de cuello uterino, con células normales, estos investigadores observaron que las células híbridas perdían su carácter canceroso.[11] Por tanto, la simple circulación de ciertos compuestos, cuya identidad todavía no se conoce, procedentes de las células normales contiguas parece ser suficiente para devolver las células a su «recto camino». Recientemente, en 1993, el equipo de Loewenstein demostró que la pérdida del carácter canceroso no se debe a las condiciones de los cultivos, ya que estas células también pierden toda su capacidad para multiplicarse en el animal y, así, formar tumores.[12]

¿UNA NUEVA PISTA TERAPÉUTICA PARA BLOQUEAR LA FORMACIÓN DE LOS TUMORES?

Muy recientemente, en colaboración con el equipo de K. Willecke, del Instituto de genética de Bonn, incorporando el gen de una conexina (conexina 26) en células cancerosas humanas no comunicantes y extremadamente agresivas, por ejemplo, células procedentes de un tumor de cuello uterino, conseguimos en el ratón inhibir totalmente su capacidad para formar tumores.[13] Por otra parte, esta ausencia de agresividad se relaciona con la reaparición de las comunicaciones a través de los enlaces.

Así, el cáncer podría ser una enfermedad de la comunicación intercelular. Esta hipótesis se ha visto reforzada con los trabajos recientes de S.W. Lee y sus colaboradores, del Dana-Farber Cancer Institute, de Boston.[14] Estos investigadores han demostrado que el gen que codifica la conexina 26 ya no se expresa en ciertos cánceres de mama. El gen de la conexina podría, por tanto, ser un supresor del tumor o «antioncogén», es decir, un gen cuya inactivación es un factor clave en la carcinogénesis. Es fácil imaginar que, en ausencia de comunicación y, por tanto, de controles reguladores procedentes de las células sanas contiguas, ciertas células con defectos genéticos que les provocan un exceso de proliferación serían más aptas para multiplicarse hasta formar tumores. Las implicaciones clínicas que podría tener esta hipótesis todavía no se han estudiado, a pesar de que actualmente se conocen sustancias químicas que inducen este tipo de comunicación mediante enlaces (por ejemplo, el ácido retinoico o el AMP cíclico). Es urgente, ahora, identificar los signos de inhibición del carácter canceroso cuya propagación tiene lugar mediante las comunicaciones establecidas a través de enlaces.

MARC MESNIL E HIROSHI YAMASAKI

(1) M. Mesnil y H. Yamasaki, *Mol. Carcinogenesis, 7*, 14, 1993.
(2) O. Traub *et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 80*, 755, 1989.
(3) A.W. Murray y D.J. Fitzgerald, *Biochem. Biophys. Res. Commun., 91*, 395, 1979.
(4) L.P. Yotti *et al., Science, 206*, 1089, 1979.
(5) T. Enamoto y H. Yamasaki, *Cancer Res., 47*, 5200, 1987.
(6) H. Yamasaki *et al., Cáncer Res., 47*, 5658, 1987.
(7) V. Krutoyskikh *et al., Carcinogenesis, 12*, 1701, 1991.
(8) H. Yamasaki y F. Katoh, *Cancer Res., 48*, 3490, 1988.
(9) P. Mehta *et al., Cell, 44*, 187, 1986.
(10) P. Mehta *et al., J. Membrane Biol., 124*, 207, 1991.
(11) E.J. Standbridge *et al., Science, 215*, 252, 1982.
(12) B. Rose *et al., Carcinogenesis, 14*, 1073, 1993.
(13) M. Mesnil *et al., Proc. Am. Assoc. Cancer Res., 34*, en prensa, 1994.
(14) S.W. Lee *et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 88*, 2825, 1991.

ANTES DE LOS PRIMEROS PASOS: LOS ORÍGENES DEL BIPEDISMO

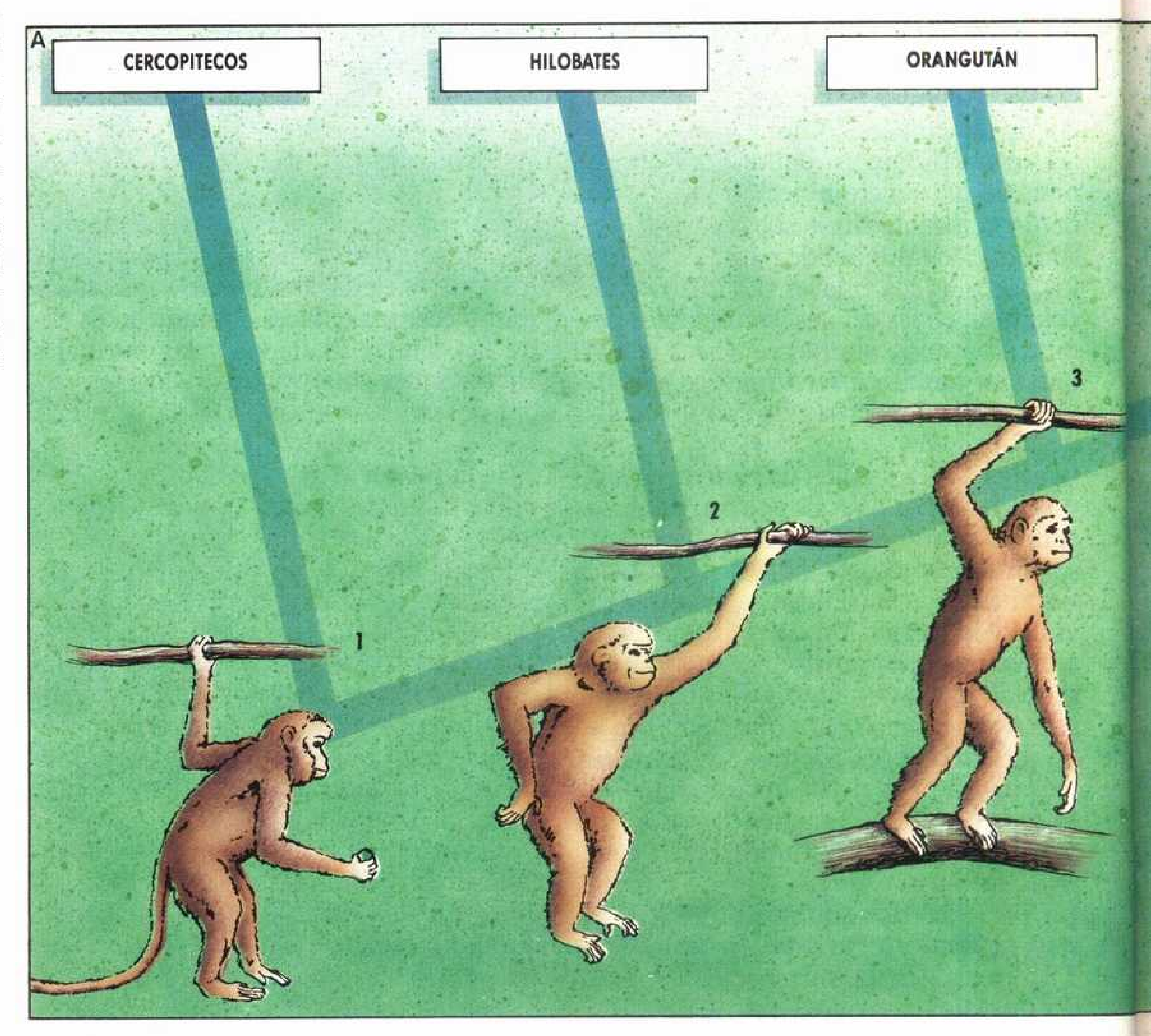
¿POR QUÉ Y CÓMO SE VOLVIERON BÍPEDOS LOS ANTEPASADOS DE LOS HOMÍNIDOS? SEGÚN UNOS INVESTIGADORES AUSTRALIANOS, SIMPLEMENTE HABRÍAN PERFECCIONADO Y SISTEMATIZADO UN COMPORTAMIENTO YA EXISTENTE.

El desarrollo del linaje humano, su separación de sus más próximos parientes, los grandes monos de África, ¿son el resultado de la evolución del bipedismo o bien del aumento del tamaño del cerebro? Después de que Mary Leakey descubriese en 1979 huellas muy antiguas de pasos de australopitecos bípedos en el emplazamiento de Laetoli en Tanzania, quedó claro que el bipedismo había precedido al desarrollo de la capacidad craneana de los homínidos.

¿Qué es lo que pudo provocar una transformación tan considerable? ¿Por qué nuestros antepasados se convirtieron en bípedos? Relativamente, se han dedicado pocos trabajos a la elaboración de modelos que expliquen esta transformación. Una buena teoría de la evolución del bipedismo tiene que tener en cuenta, en primer lugar, el hecho de que esta evolución es la misma para los dos sexos. Luego, se tiene que corresponder con los datos paleontológicos y medioambientales. Finalmente, tiene que estar de acuerdo con la anatomía y el comportamiento de los grandes monos africanos. Se tiene que admitir que la evolución hacia el bipedismo fue un proceso costoso en el plano evolutivo, ya que suponía una remodelación considerable del esqueleto, de los músculos y del sistema nervioso con objeto de hacer posible una posición erguida y una locomoción sobre las dos piernas. ¡Este proceso sigue además en curso si se juzga por el número de individuos que padecen de la espalda! Muchas teorías sobre el bipedismo han permitido identificar las distintas ventajas que procura una vez adoptado, pero la mayoría no tratan sobre lo que habrían podido ganar los prehomínidos con su establecimiento. Charles Oxnard de la universidad de Australia occidental[1] y Brigitte Senut del Museo nacional de historia natural, en Francia, fueron los primeros en demostrar que la adaptación al bipedismo de los primeros homínidos fósiles conocidos no era ni completa, ni funcional y fisiológicamente equivalente a la del hombre actual. Por consiguiente, la pregunta fundamental se refiere a la ventaja selectiva que esta forma de bipedismo, relativamente ineficaz, pudo conferir a los más antiguos prehomínidos. En nuestro laboratorio de la universidad de Australia occidental, hemos intentado responder a esta pregunta utilizando un enfoque histórico y biológico para determinar cómo se impuso el bipedismo.[2]

Los datos procedentes de los fósiles del este de África muestran que el bipedismo evolucionó en nuestros antepasados a partir del Mioceno, es decir entre 10 y 5 millones de años, en estrecha relación con los cambios del medio ambiente. El paso de un medio forestal a un medio más seco y más abierto, con menos recursos disponibles, corresponde a acontecimientos climáticos globales y regionales. Trabajos recientes, como los de Thure Cerling y sus colegas de la universidad de Utah, muestran que la hierba no se convirtió en un elemento significativo de la flora de África oriental antes de 8 o 9 millones de años.[3] Actualmente parece que entre 10 y 5 millones de años coexistieron en África oriental diversos tipos de medios, incluyendo selvas y bosques, mosaicos de bosques con claros y praderas arboladas. ¿Qué impacto tuvieron estos cambios sobre nuestros lejanos antepasados?

Hace treinta años, John Robinson, en-



¿Cómo se convirtieron en bípedos los antepasados de los homínidos? Qué ventajas podían obtener de esta nueva postura que imponía considerables transformaciones anatómicas? Unos investigadores australianos creen que el bipedismo es el resultado de la sistematización de un comportamiento bien conocido en los grandes monos: la parada de intimidación, que consiste en ponerse de pie para impresionar a un adversario (fotografía). Para explicar esta evolución proponen un análisis cladista con cinco etapas desde el antepasado común de los monos del Antiguo Mundo y de los antropoides (1) que se habría puesto de pie de forma temporal para alimentarse o para vigilar los alrededores hasta el antepasado de los gorilas, los chimpancés y el hombre (5) que habría adoptado comportamientos bípedos diversos como las paradas de intimidación y los comportamientos de apaciguamiento. (Foto Lee Lyon/Bruce Coleman Ltd.)

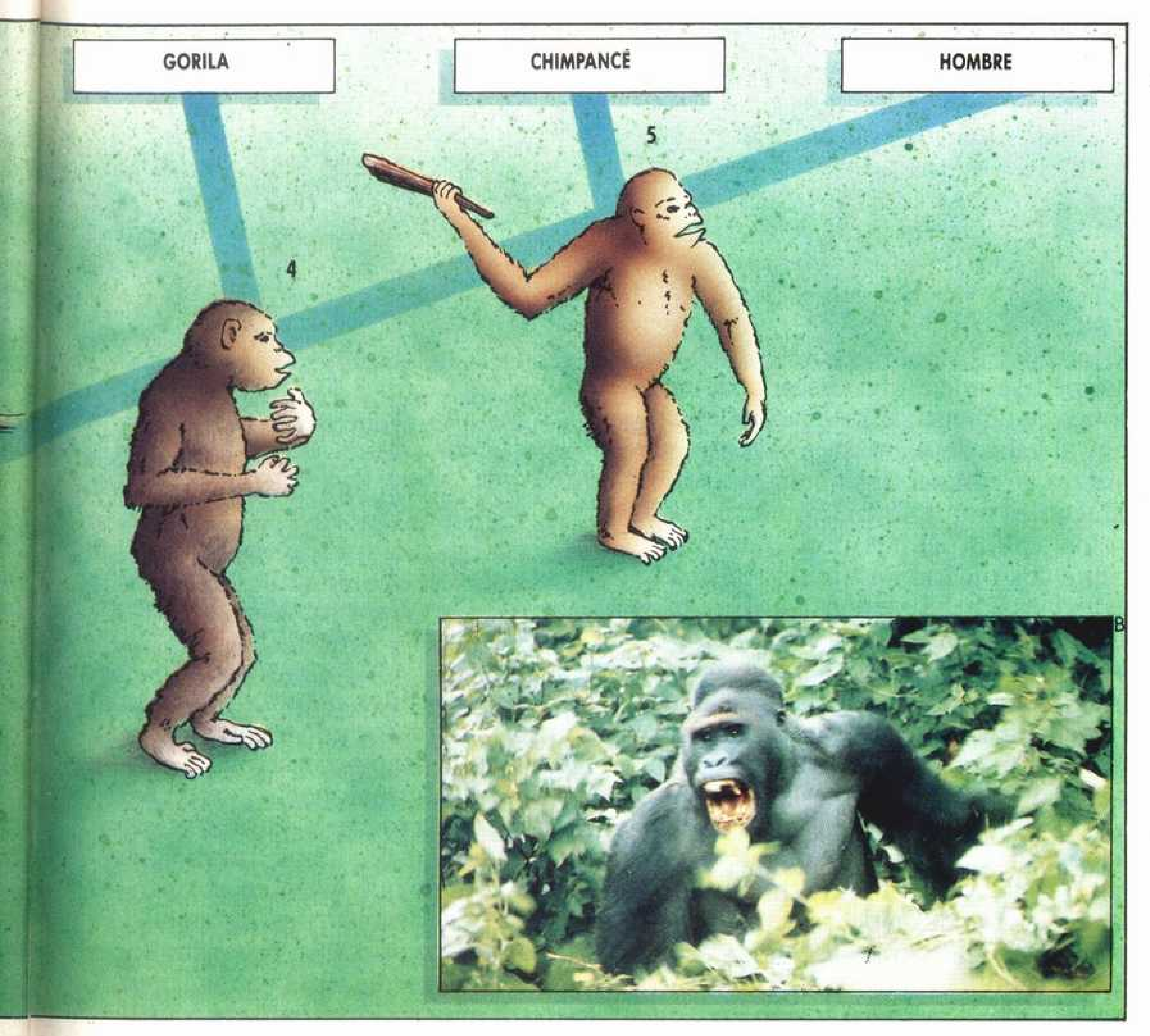
tonces en la universidad de Wisconsin, puso el acento en el hecho de que mantenerse en pie se podía considerar como el comportamiento preadaptativo al bipedismo ideal, a condición de poder demostrar que esto había aportado, en términos evolutivos, un beneficio suficiente o disminuido un coste equivalente.[4] Sugirió que el comportamiento que consiste en ponerse en pie temporalmente para vigilar los alrededores (comportamiento de centinela) pudo haber influido en esta evolución, pero consideraba que la ventaja obtenida no era suficiente para explicar la adopción permanente de la posición erguida.

Nosotros proponemos otra hipótesis: la adopción de la estación bípeda por los prehomínidos estaría relacionada con un contexto social específico, el de las agresiones en el seno del grupo y entre los grupos de primates superiores.

La adopción del bipedismo, derivada de la parada de intimidación que lleva a un mono a mantenerse derecho para amenazar a su adversario, disminuyó el coste de la morbilidad debida a estas agresiones, lo que representa una ventaja selectiva significativa. Esta ventaja se habría visto acentuada por las modificaciones medioambientales, y luego aumentada aún por los beneficios derivados de los otros comportamientos engendrados por el bipedismo: comportamiento de centinela, comunicación, etc. Se puede pensar que el bipedismo surgió de un comportamiento característico de los primates superiores en el que ya desempeñaba un papel menor. A este respecto, Michael Rose de la Escuela de medicina de New Jersey ha hecho una distinción útil entre los homínidos que poseen una anatomía dirigida hacia el bipedismo y otros primates superiores cuya anatomía se orienta hacia otras actividades, como trepar a los árboles.[5] Para comprender lo que pudo haber conducido a nuestro linaje a evolucionar de la una a la otra de estas morfologías, tenemos que utilizar las técnicas del análisis cladista para examinar los contextos comportamentales en los que los grandes monos africanos utilizan el bipedismo. Intimidar al enemigo irguiéndose en toda su altura es uno de los comportamientos más extendidos en los grandes monos para limitar las agresiones. Pero, pese a estas paradas de intimidación, las heridas debidas a los conflictos entre individuos o entre grupos son actualmente la principal causa no patológica de enfermedad en los grandes monos de África.[6] Los comportamientos de dominación y de apaciguamiento son un fenómeno extendido en numerosas especies y universal en su aplicación.[7] Así, las hembras utilizan los mismos gestos de demostración y de apaciguamiento que los machos, para establecer y mantener una jerarquía entre las hembras y para ayudar a la protección y a la cría de sus hijos de los dos sexos. Examinando el contexto en el que los primates superiores utilizaron el bipedismo durante su evolución, hemos descubierto la importancia de los comportamientos de intimidación y de apaciguamiento y su carácter reciente. Nosotros sugerimos que el uso del bipedismo (en tanto que parada de intimidación) se volvió más importante al final del Mioceno, cuando los prehomínidos empezaron a vivir en un medio más abierto en el que la comida y el agua no eran igualmente accesibles, provocando frecuentes conflictos a este respecto. Se tenía que ver favorecida la evolución de comportamientos que hiciesen posible una solución pacífica de las disputas: de ahí el recurso más frecuente a las paradas de intimidación. Una vez adoptado ampliamente este comportamiento, habría inducido una mejora notable del estado de salud de los grupos de prehomínidos por reducción de la morbilidad y de la mortalidad.

Más adelante, estas paradas se convirtieron en una parte importante del repertorio comportamental de los homínidos. Un desarrollo importante debió ser su incorporación a los juegos de los niños y los adolescentes. Luego, a través de las variantes introducidas por los individuos y los grupos, estos comportamientos se pudieron convertir rápidamente en más variados y multifuncionales, marcando así el inicio del verdadero bipedismo. En este momento, una fuerte selección en favor de estos comportamientos bípedos pudo favorecer la adquisición rápida de varios cambios anatómicos importantes requeridos por la nueva postura. En primer lugar, un lento aumento del volumen del encéfalo en respuesta a una necesidad creciente de control de la postura. El aumento del volumen craneano se acrecentó luego cuando las manos empezaron a manipular y a fabricar herramientas. Siguieron entonces todos los otros beneficios procedentes del bipedismo y de la liberación de las manos que tan a menudo se citan como las primeras causas de la evolución hacia el bipedismo. El origen del bipedismo en los antepasados de los homínidos fue la innovación clave que les permitió colonizar medios abiertos al final del Mioceno y en el Plioceno. Las raíces de esta innovación se pueden reconstruir a partir de las paradas de intimidación de los prehomínidos que permiten la solución de conflictos en los grupos y entre grupos, incluyendo los que se producían a propósito de los recursos. Este argumento está basado en la observación según la cual estos comportamientos son una característica compartida por los grandes monos y el hombre, simplemente desarrollados porque ya se utilizaban a este efecto en un contexto social determinado.

NINA G. JABLONSKI, GEORGE CHAPLIN.



(1) C.E. Oxnard, *Nature, 258*, 389, 1975.
(2) N.G. Jablonski y G. Chaplin, *J. Hum. Evol., 24*, 259, 1993.
(3) T.E. Cerling *et al., J. Hum. Evol., 21*, 295, 1991.
(4) J.T. Robinson, «Adaptative radiation in the australopithecines and the origin of man», *in* F.C. Howells, F. Bourliere (eds.), *African ecology and human evolution*, Aldine, 1963.
(5) M.D. Rose, «The process of bipedalization in hominids», *in* B. Senut, Y. Coppens, *Origine(s) de la bipédie chez les hominidés*, CNRS, 1991.
(6) J. Goodall, *The Chimpanzees of Gombe*, Harvard University Press, 1986; D. Fossey, *Gorillas in the mist*, Houghton Mifflin, 1983.
(7) F.B.M. de Waal, *Peacemaking among primates*, Harvard University Press, 1989.

LAS ELICITINAS, ALIADAS DE LAS PLANTAS CONTRA LOS PARÁSITOS

CIERTOS HONGOS SECRETAN UNAS TOXINAS, LAS ELICITINAS, QUE ESTIMULAN LAS DEFENSAS VEGETALES. LOS INVESTIGADORES PREVÉN UTILIZARLAS ALGÚN DÍA PARA PROTEGER LOS CULTIVOS.

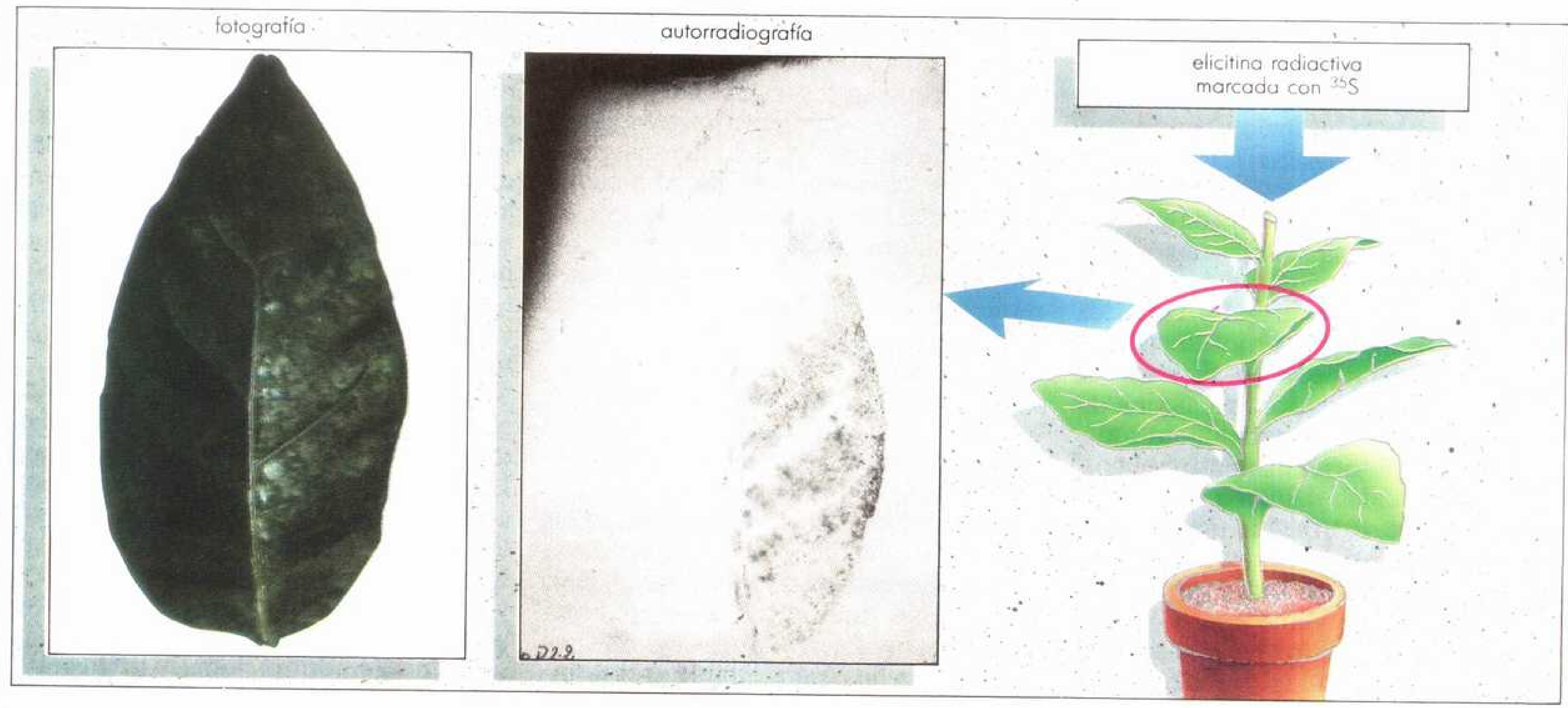


Figura 1. Con el fin de activar las defensas de las plantas ante un patógeno causante de una agresión, actualmente se intenta transferir, mediante ingeniería genética, un gen modificado de elicitinas. Las elicitinas son unas pequeñas proteínas segregadas por hongos parásitos de las plantas, unos Phytophthora. Inducen reacciones de defensa que pueden proteger las plantas contra las infecciones microbianas. Estas reacciones provocan, a su vez, la formación de necrosis, es decir, de zonas muertas en las hojas. Tal como ilustran las fotografías. A una planta de tabaco se le inocularon 40 μg de capsiceína, una elicitina producida por el Phytophthora capsice. Esta elicitina se marcó in vivo con azufre radiactivo ^{35}S. Después de 48 horas, se tomaron las hojas, se fotografiaron y se sometieron a una autorradiografía. La fotografía de la izquierda muestra la formación de necrosis en la mitad derecha de la hoja. La autorradiografía de la misma hoja, a la derecha, indica que la localización de la radiactividad (en la capsiceína, zonas oscuras) es superponible a las necrosis. Por tanto, es evidente que esta sustancia es la responsable de las necrosis foliares. (Fotos J.-C. Pernollet.)

Las pérdidas agrícolas a causa de agentes patógenos —bacterias, virus y hongos— son considerables, y la utilización de plaguicidas químicos se restringe cada vez más a causa de la contaminación que provocan. Sin embargo, la mayoría de los microorganismos son incapaces de atacar los vegetales, ya que quedan detenidos por los mecanismos de defensa de las plantas. Por este motivo, y entre otros métodos, la mejora de las defensas naturales es, en la lucha contra los patógenos, una vía de investigación prometedora a la vez que respetuosa con el medio ambiente.

En los últimos meses, varios resultados importantes han venido a apoyar esta perspectiva. Diversos equipos, especialmente la estación de patología vegetal del INRA de Antibes, han estudiado unas proteínas, las elicitinas, producidas por hongos parásitos de vegetales. Se ha demostrado que estas moléculas inducen la formación de necrosis en las hojas y, al propio tiempo, estimulan las defensas de las plantas infestadas. Entre estos equipos, el laboratorio de estudio de las proteínas que yo mismo dirijo en el INRA de Versalles ha podido determinar la estructura correlacionándola con su actividad. El conocimiento de esta estructura permite conocer los mecanismos moleculares subyacentes en la actividad de las elicitinas y, por tanto, modificarlos para aumentar sus potencialidades prácticas como agentes antimicrobianos.

Cuando un microorganismo produce una agresión, la planta, gracias a unos mecanismos moleculares todavía bastante imprecisos, reconoce ciertas sustancias conocidas bajo el hombre genérico de «elicitores» (del inglés *to elicit*: provocar). En el caso de los hongos parásitos, se trata, normalmente, de productos procedentes del huésped o del propio hongo, debidos a degradaciones provocadas por enzimas sintetizados por el hongo o la planta.

Los elicitores hacen que en las células-huésped se inicie una cascada de reacciones de defensa. Estas reacciones causan, al cabo de algunas horas, una respuesta de «hipersensibilidad» que se caracteriza por la formación de necrosis en los tejidos del huésped. Más exactamente, los elicitores estimulan la síntesis de toxinas (las fitoalexinas), activan unos enzimas que originan la producción de una hormona (etileno), e inducen la expresión de «proteínas de patogenicidad» y de enzimas dirigidos contra el agresor. También favorecen en las paredes celulares del huésped la síntesis de la lignina, un polímero muy resistente, componente principal de la madera. Esta lignificación de las hojas está relacionada con la formación de las necrosis y con la muerte de las células foliares. De cualquier modo, la planta resiste al invasor practicando el método de la «tierra quemada»: los tejidos muertos ya no pueden ser explotados por el microorganismo para su propio desarrollo.

Entre las fitopatógenas, el género *Phytophthora* (del griego *phuton*, planta, y *phthora*, ruina), que comprende algunos hongos que viven en el suelo, es sinónimo de catástrofes agrícolas. El *Phytophthora infestans*, por ejemplo, es el agente del mildiú de la patata, causante de la emigración irlandesa a media-

dos del siglo XIX y del desarrollo de la patología vegetal como disciplina científica. Los *Phytophthora* provocan todavía importantes daños en muchos árboles cultivados, ya que son vulnerables a muy pocos fungicidas clásicos.

Hace unos quince años, A. Csinos y J.W. Hendrix, de la universidad de Kentucky,[1] observaron que, aparte de la especie *Phytophthora nicotinae*, los *Phytophthora* son incapaces de parasitar el tabaco (especies incompatibles), pero provocan su debilitamiento y la aparición de necrosis foliares. El *Phytophthora nicotinae* es la única especie patógena del tabaco: su micelio invade las raíces y los tallos y provoca la enfermedad del black shank, caracterizada por la putrición del pie y causante, finalmente, de la muerte de la planta. Philippe Bonnet, del INRA de Antibes, demostró en 1986 que las necrosis provocadas por los *Phytophthora* incompatibles se deben a sustancias contenidas en los filtrados de cultivo de tales hongos. En 1989, nuestro equipo aisló, purificó y describió estas proteínas, a las que dimos el nombre de «elicitinas».[2] Esto permitió demostrar que el tratamiento de una planta de tabaco con inoculación de una solución de elicitina, cualquiera que sea su procedencia específica, la protege frente a la especie patógena.[3] En cambio, en los filtrados de cultivo del patógeno del tabaco, *Phytophthora nicotinae*, no se detecta ninguna elicitina.[4] En efecto, esta planta es muy sensible a las elicitinas y reacciona activamente a cualquier intento de invasión de un *Phytophthora*, segregando dichas moléculas. Por tanto, solamente el *P. nicotinae*, que no las segrega, puede causar la enfermedad del black shank.

Al estudiar una serie de elicitinas naturales producidas por diversas especies de *Phytophthora* no compatibles con el tabaco, pudimos demostrar recientemente que la función de inductor de necrosis y la de activador de las defensas vegetales características de los elicitores corren a cargo simultáneamente de una sola molécula proteica. Estas proteínas, de tamaño modesto (98 aminoácidos), pertenecen a dos categorías fisicoquímicas, llamadas α y β. Las segundas, cien veces más tóxicas que las primeras, pueden inducir necrosis a dosis del orden del picomol.[4,5] Por otra parte, ciertas especies de *Phytophthora* segregan varias isoformas pertenecientes a dos clases de elicitinas.[4,6] Entre los elicitores conocidos, la originalidad de las elicitinas consiste en que no sufren ninguna modificación después de su síntesis[5] —como, por ejemplo, la adición de cadenas glucídicas— excepto la ablación de una corta secuencia N-terminal de secreción.[7] Por consiguiente, sus actividades biológicas dependen de una estructura proteica, consecuencia tan sólo del encadenamiento de los aminoácidos, lo que favorece enormemente su producción mediante ingeniería genética.

A partir de 1991, hemos seguido su migración en el tabaco con marcaje *in vivo* mediante radiactividad. Observamos que las elicitinas son capaces de penetrar en la planta por el sistema radicular[4] y migrar, sin ser modificadas, al flujo de savia para acumularse rápidamente en las regiones foliares donde, a continuación, aparecen las necrosis (fig. 1). Las elicitinas actúan directamente sobre las células-diana de las hojas, y sus velocidades de migración en el tabaco son idénticas e independientes de su poder necrótico.[8] Entretanto, Jean-Pierre Blein y su equipo del laboratorio de fitofarmacia del INRA de Dijon han demostrado en células de tabaco en cultivo que una elicitina, la criptogeína β, se une a su membrana plásmica. Altera mucho el funcionamiento celular, ya que induce consecutivamente reacciones de defensa, como la producción de etileno y de fitoalexinas.[9]

Figura 2. La resonancia magnética nuclear multidimensional permite determinar la estructura en el espacio de la capsiceína. Esta proteína, cuyas dimensiones son 35 x 20 x 20 angstrom, comprende cinco hélices α y una hoja β antiparalela. Se caracteriza por un surco, emplazamiento activo potencial, y la posición especial del aminoácido nº 13 de la cadena, cuya naturaleza —una valina en la capsiceína (flecha)— está estrechamente relacionada con la toxicidad de las elicitinas. Este aminoácido, situado al borde del surco, podría controlar el acceso mediante un sustrato que todavía no ha sido descubierto. El conocimiento de la naturaleza y de la posición de los aminoácidos causantes del poder tóxico de las elicitinas permitirá alterarlos por mutagénesis dirigida con el fin de obtener genes de elicitinas no tóxicas, pero capaces de inducir defensas. Estos genes «desarmados» podrán transferirse a plantas cultivadas para conferirles una resistencia mayor ante los microbios. (Foto E. Guittet y J.-C. Pernollet.)

LAS ELICITINAS ACTUARÍAN, LO MISMO QUE CIERTAS TOXINAS DE VENENOS, A NIVEL DE LA MEMBRANA CELULAR

En 1989, decidimos determinar las secuencias completas de ocho elicitinas de toxicidad diferente.[2,5,6,10] Relacionando las secuencias y las actividades necróticas de estas proteínas, pudimos localizar alrededor de la posición 13 de sus cadenas proteicas una corta región que interviene en la regulación de la actividad necrótica,[6] así como otros emplazamientos que pueden modular esta regulación.[10] Constatamos que las variaciones de la estructura primaria (el orden de encadenamiento de los aminoácidos) corresponden a las dos clases diferenciadas α y β de las que hemos hablado.

En consecuencia, el estudio de la estructura de las elicitinas en solución mediante espectroscopia nos demostró que poseen estructuras secundarias (primer nivel de repliegue en el espacio de la cadena proteica) análogas, pero no perfectamente idénticas.[5,6] Las mutaciones puntuales que diferencian las elicitinas no son, por tanto, capaces de alterar sen-

(1) A. Csinos *et al.*, *Soil Biol. Biochem.*, *10*, 47, 1978.
(2) J.C. Huet *et al.*, *FEBS Letters*, *257*, 302, 1989.
(3) P. Ricci *et al.*, *Eur. J. Biochem.*, *183*, 555, 1989.
(4) J.C. Pernollet *et al.*, *Physiol. Molec. Plant Pathol.* *42*, 53, 1993.
(5) C. Nespoulous*et al.*, *Planta*, *186*, 551, 1992.
(6) J.C. Huet *et al.*, *Phytochemistry*, *31*, 1471, 1992.
(7) T. Tercé-Laforgue *et al.*, *Plant. Physiol.*, *98*, 936, 1992.
(8) A. Zanetti *et al.*, *Planta*, *187*, 163, 1992.
(9) J.P. Blein *et al.*, *Plant Physiol.* *95*, 486, 1991.
(10) J.C. Huet *et al.*, *Phytochemistry*, *33*, 797, 1993.
(11) J.P. Guilloteau *et al.*, *J. Molec. Biol.*, *229*, 164, 1993.
(12) S. Kamoun *et al.*, *Molec. Plant-Microbe Interaction* , *6*, 15, 1993.

siblemente su estructura global. Además, gracias al equipo de Eric Guittet, del Instituto de sustancias naturales del CNRS, de Gif-sur-Yvette, la estructura tridimensional de una elicitina α, la capsiceína, producida por el *Phytophthora capsici*, ha podido ser determinada por resonancia magnética nuclear (RMN), después de un marcaje isotópico con nitrógeno 15 *in vivo*. Muestra la posición particular del residuo 13 en el espacio (fig. 2) y actualmente ya permite una aproximación al mecanismo molecular de la toxicidad de las elicitinas. En efecto, la analogía de la estructura de una región terminal de la capsiceína con la de toxinas proteicas contenidas en ciertos venenos de serpiente hace pensar —a pesar de que las células animales son insensibles a las elicitinas y que la toxicidad de los venenos jamás ha sido descrita en los vegetales— que las elicitinas podrían insertarse en la membrana celular para desorganizarla, a la manera de ciertas toxinas de venenos (véase «Los venenos de las serpientes», *Mundo Científico*, nº 73, octubre 1987). Para verificarlo, nosotros seguimos el estudio de una elicitina β por RMN y, paralelamente, por cristalografía con rayos X, con la ayuda de cristales de criptogeína β, una molécula muy tóxica. Este trabajo se hizo en colaboración con el equipo de Simone Brunie, de la unidad de ingeniería de las proteínas del INRA, de Jouy-en-Josas.(11)

Sin embargo, los efectos de las elicitinas no se limitan al tabaco. En 1993, demostramos que las elicitinas producidas por diferentes especies de *Phytophthora* son tóxicas para otras especies vegetales a dosis a veces más pequeñas.(4) Por otra parte, el equipo californiano de B.M. Tyler descubrió recientemente que las elicitinas son capaces de inducir en el rábano una defensa efectiva contra unas bacterias patógenas, las *Xanthomonas campestris*.(12) Por consiguiente, es posible aplicar métodos generales de lucha antimicrobiana basados en las elicitinas.

Para ello, puede transferirse un gen de elicitina a una planta, pero modificándolo previamente de manera que la planta produzca moléculas proteicas no necróticas, aunque todavía capaces de inducir resistencia. En colaboración con el equipo de David Tepfer, del laboratorio de la rizosfera, del INRA, de Versalles, intentamos también transformar el tabaco en otras especies vegetales con un gen de síntesis creado a partir de la secuencia de las elicitinas. Además, las elicitinas o sus derivados futuros son un origen potencial de nuevos herbicidas.

Estas plantas transgénicas permitirán el avance de nuestros conocimientos sobre los mecanismos de defensa de las plantas.

JEAN-CLAUDE PERNOLLET

EL GENOMA HUMANO BALIZADO POR MICROSATÉLITES

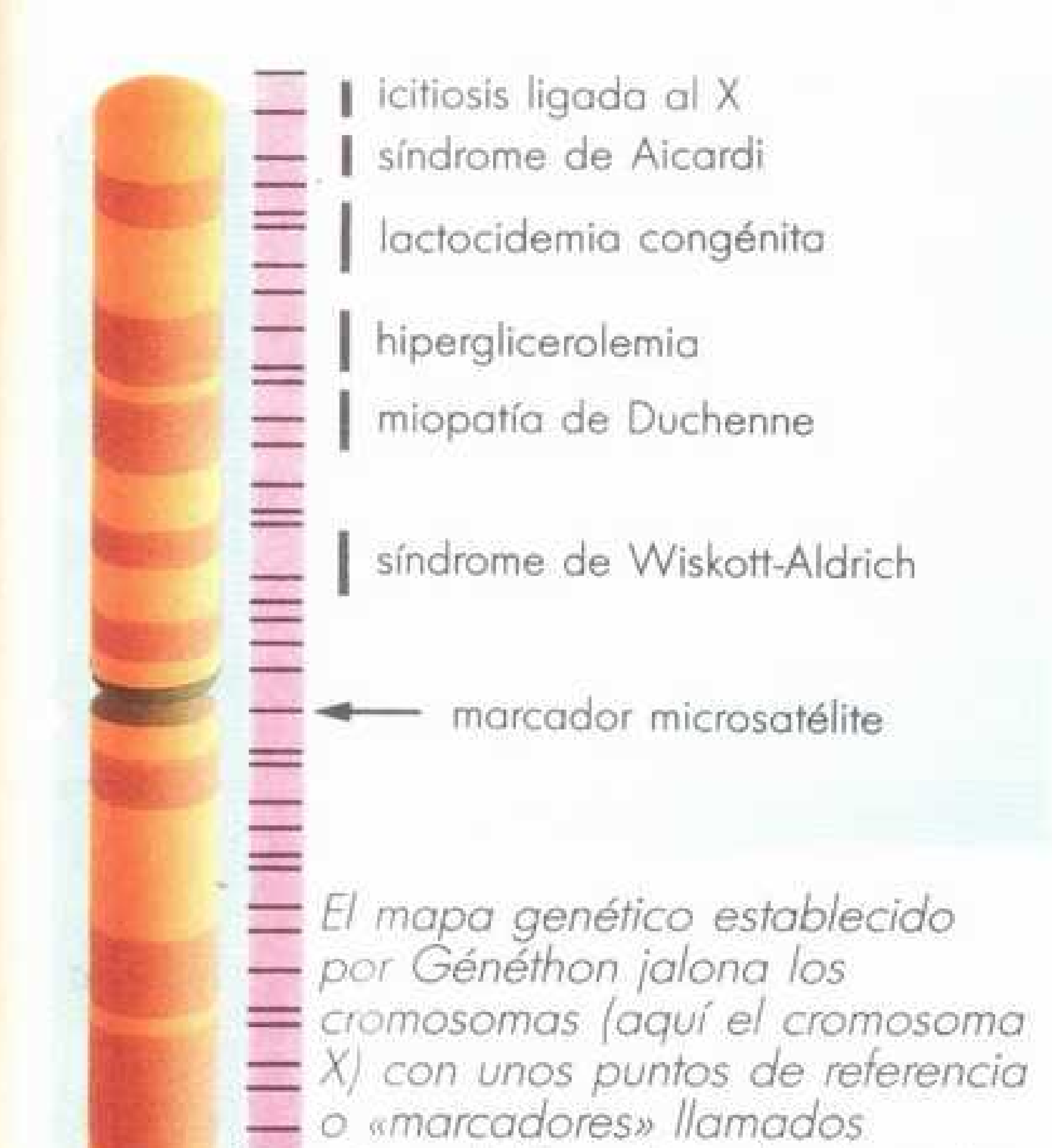
UN MAPA GENÉTICO DE LOS CROMOSOMAS HUMANOS, DE UNA RESOLUCIÓN JAMÁS ALCANZADA, PERMITE ACELERAR CONSIDERABLEMENTE LAS INVESTIGACIONES SOBRE LAS ENFERMEDADES GENÉTICAS.

En el hombre se han contabilizado de tres a cinco mil enfermedades hereditarias debidas a la anomalía de un gen. Algunas, como la mucoviscidosis, que afecta a uno de cada mil recién nacidos, están muy difundidas. Otras, como la carencia de adenosindesaminasa, son rarísimas. Comprender una enfermedad genética significa identificar el gen defectuoso entre los cincuenta mil a cien mil genes que componen el genoma humano y determinar la naturaleza del defecto y sus repercusiones bioquímicas. En el horizonte están la disección de los mecanismos patógenos, el diagnóstico precoz genético y un eventual tratamiento. Los trabajos realizados actualmente en el laboratorio Généthon, de Evry, en Francia, constituyen un avance considerable al respecto. Se trata de la construcción de un mapa genético de los cromosomas humanos de una precisión sin precedentes, que utiliza como puntos de referencia unas pequeñas secuencias de ADN dispersas por el genoma llamadas microsatélites. Es como si se hubiera balizado una biblioteca —el genoma— que constará de unos tres mil millones de letras: los nucleótidos que, en secuencia, forman el ADN. Gracias a las balizas, los investigadores pueden ahora localizar una frase incorrecta, esto es, un gen defectuoso.

Hasta ahora, la estrategia para remontarse de la enfermedad al gen era la siguiente. En primer lugar, se localizaba el mayor número posible de familias afectadas. Después de una minuciosa investigación familiar, se establecía una árbol genealógico que contabilizaba los sujetos afectados. El análisis de dicho árbol permite ver si la enfermedad se transmite según las leyes genéticas simples enunciadas en el siglo pasado por Gregor Mendel. Si tal es el caso, es posible partir en busca del gen responsable. Hagamos notar que muchas enfermedades no se transmiten según las leyes de Mendel pero tienen un origen parcialmente genético. Se trata de enfermedades frecuentes como la diabetes, la soriasis, ciertos cánceres, así como enfermedades cardiovasculares o neurosiquiátricas, en todas las cuales intervienen a la vez factores genéticos y ambientales.

¿Cómo localizar, a partir de los individuos enfermos, la región cromosómica en la que se encuentra el gen defectuoso? El examen de los cromosomas al microscopio permite a veces asociar un defecto visible a una enfermedad genética. Pero en la mayoría de los casos los investigadores no disponen de un tal indicio. Proceden entonces igual que han hecho generaciones de genéticos para cartografiar defectos genéticos en especies de laboratorio (levadura, drosófila, ratón). La técnica, que data de hace más de cincuenta años, consiste en cruzar dos individuos y en estudiar cómo van a parar los caracteres a la descendencia. Si dos genes que gobiernan dos caracteres están muy próximos en el cromosoma, suelen transmitirse juntos. Si están más alejados, pueden quedar separados, al formarse los gametos, por intercambio de segmentos entre cromosomas (recombinaciones). Así, la distancia entre los genes puede estimarse a partir de las frecuencias de recombinación observadas. Multiplicando los cruces entre mutantes, se logra poco a poco disponer linealmente los genes en los cromosomas. En genética humana, los investigadores, por medio de estudios de familias, también tratan de asociar la transmisión de la enfermedad a la de otros caracteres hereditarios. Este método, sin embargo, nunca ha permitido establecer un mapa genético en el hombre porque el número de caracteres hereditarios presentes en diversas formas en la población (caracteres polimorfos), que se heredan según las leyes de Mendel, es muy pequeño. Estos caracteres, que podrían servir de «marcadores», se limitan a las enfermedades genéticas identificadas y a ciertos caracteres hereditarios reconocibles como los grupos sanguíneos o los grupos tisulares HLA.

Una primera solución al problema surgió en 1980 cuando se observó que ciertas secuencias (cadenas de nucleótidos de la molécula de ADN) difieren muchas



El mapa genético establecido por Généthon jalona los cromosomas (aquí el cromosoma X) con unos puntos de referencia o «marcadores» llamados microsatélites. Se trata de cortas secuencias de ADN, distribuidas por todo el genoma, que difieren mucho de un individuo a otro. Cada uno de los trazos de la figura (parte central) corresponde a la posición relativa de un microsatélite. A título indicativo, se mencionan algunas enfermedades hereditarias cuyos genes han sido ya localizados en el brazo corto del cromosoma X. Con los marcadores microsatélites se hace posible, mediante estudios de relaciones genéticas, localizar mucho más rápidamente un gen responsable de una enfermedad hereditaria.

veces de un individuo a otro, o incluso de una copia a otra del genoma —materna o paterna— presentes en una persona. Estas diferencias individuales pueden utilizarse como marcadores genéticos (véase «Los mapas del genoma humano», *Mundo Científico*, nº 99, febrero, 1990). Las secuencias polimorfas se encuentran en los cromosomas a intervalos de cientos o miles de nucleótidos. Las variaciones entre individuos se ponen de manifiesto mediante una técnica, llamada «Southern blot», que consiste en cortar el ADN por medio de unos enzimas (llamados de restricción) que reconocen determinadas zonas y, luego, en separar los fragmentos obtenidos, según el tamaño, por medio de un campo eléctrico. Según que haya o no variación en la secuencia de ADN, una zona de reconocimiento de un enzima podrá aparecer o desaparecer, lo cual modificará el tamaño del fragmento. De ahí el nombre de RFLP (por *Restriction Fragment Length Polymorphism*) dado a estos fragmentos. Así se ha logrado construir un mapa genético de referencia, que posiciona las zonas de polimorfismo unas con respecto a otras. Este mapa, iniciado a mediados de la década de 1980, ha sido obra de una colaboración internacional entre laboratorios bajo la égida del Centro de estudios del polimorfismo humano (CEPH) de París.[1] Lamentablemente, los RFLP tienen varios inconvenientes. En primer lugar, su nivel de variación es bajo, lo que significa que muchos individuos llevan dos ejemplares idénticos del mismo marcador. Ello limita considerablemente las informaciones que se pueden obtener de los estudios de familias. En segundo lugar, muchas regiones del genoma están mal cubiertas. Tal cosa ha inducido a distintos equipos a buscar nuevas secuencias de ADN poseedoras de una variabilidad mucho más importante.

Grandes esperanzas suscitó el descubrimiento de unas secuencias, llamadas «minisatélites», constituidas por repeticiones de un mismo motivo de unos pocos nucleótidos (hasta unos cien). Los minisatélites, descubiertos a mediados de los años 1980 por Allan Jeffreys, de la universidad de Leicester, en Gran Bretaña,[2] son numerosos en el genoma humano (hasta varios miles) y su longitud varía de una persona a otra y del cromosoma paterno al cromosoma materno de una misma persona. El polimorfismo de estos marcadores es tal que permiten distinguir a dos personas, aunque estén emparentadas, por lo que se han impuesto en medicina legal para la identificación de criminales o de víctimas (véase «La genética al servicio de los carnés de identidad», *Mundo Científico*, nº 67, marzo, 1987). En el hombre, los minisatélites se encuentran sobre todo en los extremos de los cromosomas y no permiten cubrir todo el genoma.

En 1989, M. Litt, de Portland, y J.L. Weber, de Marshfield, Estados Unidos, demostraron que otras secuencias parecidas a los minisatélites, lo microsatélites, también son polimorfas.[3,4] Los microsatélites constan de uno a cinco nucleótidos que se repiten de diez a treinta veces (por ejemplo, un microsatélite frecuente en los mamíferos contiene los dos nucleótidos C y A repetidos). Como en los minisatélites, las variaciones entre individuos corresponden a un número distinto de repeticiones del motivo básico. Pueden ponerse de manifiesto por medio de la técnica PCR, que permite obtener gran número de copias de un fragmento de ADN. Hay muchísimos microsatélites en el genoma humano, hasta varias decenas de miles, aparentemente bien distribuidos por los cromosomas.

La cartografía basada en estos marcadores posee así una precisión mucho más fina. Los microsatélites se buscan en un banco de ADN humano y luego se posicionan unos con respecto a otros en los cromosomas analizando su transmisión de generación en generación en algunas familias censadas por el CEPH. Según el principio de la relación genética, los marcadores transmitidos en bloque están muy cerca unos de otros. A partir de este mapa de referencia (véase la figura), es posible delimitar rápidamente una región del genoma implicada en un desorden genético. Para ello, se intenta asociar la transmisión de la patología a la de uno o varios microsatélites. Dado que estos últimos están dispuestos a lo largo de los cromosomas, se va delimitando paulatinamente la región en la que está situado el defecto.

En 1992, se publicaron dos mapas genéticos con menos de un mes de intervalo. Una primera serie de trabajos, patrocinados por los NIH (National Institutes of Health) norteamericanos y por el CEPH, permitió integrar 340 marcadores microsatélites al mapa genético existente, formado sobre todo por antiguos RFLP.[5] Este notable trabajo, en el que participaron cientos de científicos, no fue más que una etapa. Un mapa de segunda generación, formado por 814 marcadores microsatélites, fue propuesto el mismo año por el Généthon.[6] Una versión reciente de este mapa, con más de dos mil marcadores, permite una cobertura densa de gran parte del genoma.[7] De aquí a fines de 1994, un nuevo mapa con cuatro o cinco mil marcadores permitirá un balizado todavía más completo.

Con esta cartografía genética se han localizado ya más de diez genes. Entre los últimos que se han descubierto figura un gen de predisposición al cáncer de colon[8,9] y el gen responsable de una grave enfermedad digestiva conocida bajo el nombre de enfermedad de Hirschprung.[10] A corto plazo, el descubrimiento de estos genes permitirá disponer de un test genético que indique la presencia o ausencia del defecto en el individuo; a más largo plazo, se puede pensar en corregir, a escala de gen, el defecto responsable de la enfermedad.

Pero el mapa genético tiene un límite, ya que los puntos de referencia informan sólo sobre las distancias *relativas* entre genes. El laboratorio Généthon está construyendo actualmente un mapa *físico* del genoma humano, que consiste en dividir el genoma en fragmentos de ADN cuya yuxtaposición cubre el conjunto de los cromosomas (véase «El genoma al alcance de la mano», *Mundo Científico*, nº 132, febrero, 1993). Para asignar a estos fragmentos de ADN un lugar preciso en los cromosomas, hay que relacionarlos con los puntos del mapa genético. En este momento, se han tenido en cuenta ya más de mil marcadores genéticos.

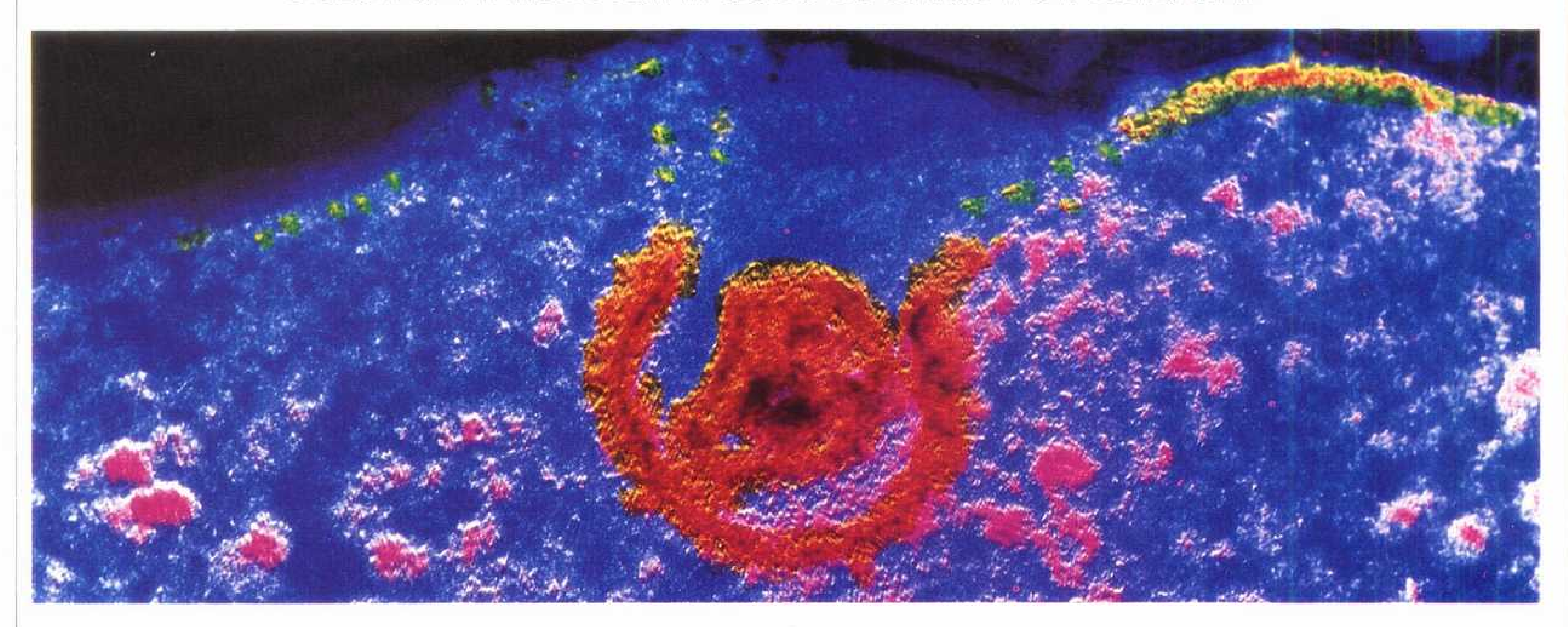
Al término del trabajo, en el que colaboran los equipos de Daniel Cohen y de Jean Weissenbach, la comunidad científica dispondrá del primer mapa integrado del genoma, que permitirá una ganancia de varios años en la identificación del un gen responsable de una enfermedad hereditaria.

JEAN WEISSENBACH Y ANNICK DE CHENAY

(1) J. Dausset *et al.*, *Genomics*, *6*, 575, 1990.
(2) A. Jeffreys *et al.*, *Nature*, *314*, 67, 1985.
(3) M. Litt *et al.*, *Am. J. Hum. Genet.*, *44*, 388, 1989.
(4) J.L. Weber *et al.*, *Am. J. Hum. Genet.*, *44*, 388, 1989.
(5) NIH/CPH, *Science*, *258*, 67, 1992.
(6) J. Weissenbach *et al.*, *Nature*, *359*, 794, 1992.
(7) J. Weissenbach *et al.*, comunicación al congreso nacional francés de enfermedades neuromusculares, junio de 1993.
(8) P. Peltomäki *et al.*, *Science*, *260*, 810, 1993.
(9) L.A. Altonen *et al.*, *Science*, *260*, 812, 1993.
(10) S. Lyonnet *et al.*, *Nature Genet.*, *4*, 346, 1993.

¿UN SEGUNDO RECEPTOR PARA EL VIRUS DEL SIDA?

¿CÓMO ENTRA EL VIRUS DEL SIDA EN LAS CÉLULAS INMUNITARIAS? RECIENTEMENTE, UNOS INVESTIGADORES HAN APUNTADO UN POSIBLE MECANISMO. PERO LA CUESTIÓN PARECE ESTAR LEJOS DE DARSE POR CERRADA.



El virus del sida (aquí en microscopia electrónica) penetra en los linfocitos fusionando su envoltura con la membrana celular. Pero ¿mediante qué interacciones moleculares entre el virus y las células? Esta cuestión está lejos de haber sido resuelta. Prueba de ello es la reciente controversia sobre el descubrimiento, en el Institut Pasteur de París, de un segundo receptor del virus, una proteína llamada CD26. (Foto Instituto Pasteur-CNRI.)

Uno de los primeros acontecimientos cruciales en la infección del sistema inmunitario por el virus del sida (VIH) es su fijación a unos glóbulos blancos, ciertos linfocitos T. Esta fijación es el preludio de su destrucción por el virus. En el «8ème Colloque des Cent Gardes», celebrado en octubre de 1993 en Marnes-La-Coquette (HautsúSeine), Ara Hovanessian, director de investigación del CNRS del Institut Pasteur de París, anunció a la prensa —después de haber sometido un artículo a la revista *Science*, pero antes de su comunicación a la comunidad científica, lo que suscitó numerosas críticas— el descubrimiento de una «segunda cerradura» que sería indispensable para la entrada del virus en las células. Se trata de un enzima de la superficie de los linfocitos T, llamado CD26, que interaccionaría con una «llave» existente en una molécula de la envoltura vírica, la glicoproteína 120 (gp120).[1]

¿Por qué hay que hablar de una segunda cerradura? En 1984, Angus G. Dalgleish y sus colegas del Instituto de investigación del cáncer y del University College, de Londres, el equipo reunido en torno a David Klatzmann y Jean-Claude Gluckman, del hospital de la Pitié-Salpetrière, y Luc Montagnier, del Instituto Pasteur de París, demostraban que el virus del sida penetra en ciertos linfocitos T gracias a su fijación a una molécula presente en su superficie: la proteína T4 o CD4.[2] Hasta estos últimos meses, el único receptor de los linfocitos T identificado para interaccionar con la envoltura vírica era esta proteína. Sin embargo, desde hace varios años, los investigadores sospechan que hay otro receptor que interviene en la entrada del virus en las células. En efecto, un gran número de trabajos han demostrado que algunas células de roedores que expresan la molécula CD4 humana son resistentes a la infección: fijan el VIH, pero éste no penetra en ellas.[3] Para explicar esto, se mencionaba un mecanismo de inhibición de la fusión de la envoltura vírica con la membrana celular y que habría sido propio de las células murinas. Pero el equipo de C.C. Broder y E.A. Berger, del National Institute of Allergy and Infectious Diseases, de Estados Unidos, demostró en 1993, utilizando híbridos de células humanas y de células murinas que expresan la molécula CD4, que esto no es así.[4] Otro factor que hace que dicha molécula parezca ser necesaria para la entrada del virus.

Otros datos indican que una región de 35 aminoácidos de la proteína gp120, la «hélice V3», tiene un papel esencial en la penetración del virus.[5] Por ejemplo, los anticuerpos dirigidos contra esta región son capaces de impedir la infección de células *in vitro*, a pesar de que el virus se fija siempre en el receptor CD4. De igual modo, las mutaciones del bucle V3 reducen la capacidad del virus para infectar las células, pero sin modificar la unión de la envoltura vírica con la proteína CD4.[6] Así, pues, la hélice V3 del virus parece intervenir después de la fijación de éste en CD4. Pero ¿cuál podría ser su papel?

A principios de 1990, se conocían al menos dos enzimas, la trombina y la catepsina E, capaces, *in vitro* y en un sistema purificado, de cortar la hélice V3 en puntos precisos. La cuestión era, pues, saber si la acción de uno o de varios enzimas presentes en la superficie de los linfocitos podrían intervenir en la infección mediante la modificación de la hélice V3.[7,8]

Comparando la hélice V3 de numerosas cepas de VIH, gracias a las secuencias almacenadas en el banco de datos de Los Álamos, Estados Unidos, el equipo de Hovanessian observó, en 1992, que muchas regiones compuestas por dos aminoácidos (glicina-prolina o arginina-prolina en el VIH-1) siempre se conservaban, mientras que los otros aminoácidos de la hélice V3 son extraordinariamente variables según las diversas cepas de virus. También comprobó que existían algunos motivos casi idénticos (arginina-prolina y lisina-prolina) en cepas del

VIH-2 y del SIV (virus del mono). Ahora bien, existe un enzima, conocido desde finales de los años 1960, que corta las proteínas a nivel de estos diferentes motivos invariables: se trata de la dipeptidil peptidasa IV (DPP IV). El gen correspondiente fue clonado en 1992 por el equipo de Chikao Morimoto, del Instituto Dana-Faber, de Boston.[9] Desde hace algunos años, también se sabe que este enzima es una proteína de la membrana de los linfocitos T (CD26) que contribuye a la activación de estas células. Ciertos argumentos indirectos abogan en favor de una intervención de la molécula CD26 en la entrada del virus. Por ejemplo, en pacientes seropositivos de VIH, el número de células que producen la CD26 disminuye,[10] lo que significaría que es precisamente en las células donde puede penetrar el virus. Además Hovanessian y sus colaboradores piensan que la molécula CD26 interviene, junto con la envoltura vírica, en la apoptosis, o muerte celular programada, que podría ser causa de la destrucción progresiva de las células inmunitarias.[12]

Para intentar demostrar sus hipótesis, A. Hovanessian, Christian Callebaut, Bernard Krust y Etienne Jacotot han utilizado una particular técnica experimental destinada a detectar *in vitro* la entrada del VIH en las células y que consiste en colocar en su presencia células sensibles al virus (linfocitos o monocitos humanos). Al cabo de una hora, las partículas víricas del medio son eliminadas por un tratamiento enzimático (adición de tripsina). Las que han penetrado en las células se detectan inmediatamente en los extractos celulares mediante un test inmunológico (Elisa) que revela la presencia de un antígeno característico del virus (p24). Por otra parte, una parte de las células vuelve a colocarse en cultivo durante tres días con el fin de evaluar su producción de partículas víricas. Gracias a esta técnica, los investigadores demuestran que un anticuerpo monoclonal (IF7) dirigido contra la molécula CD26, o un tripéptido (IPI) que inhibe específicamente este enzima, bloquea en más del 80 % la entrada del virus. Esto ocurre en diversas cepas del VIH-1 y del VIH-2. Se han repetido otros experimentos del mismo tipo introduciendo los genes de las moléculas humanas CD4 y CD26 en células de ratón que no poseen naturalmente estos receptores y que, por tanto, son insensibles al virus. Resultado: únicamente las células en las que se han introducido los dos genes son sensibles al virus. En cambio, la ausencia de CD26 o de CD4 basta para impedir su entrada. Según el equipo de Hovanessian, la molécula CD26 es el segundo receptor indispensable para la penetración del virus.

¿Cuál sería su modo de acción? Para la mayoría de especialistas, en un primer tiempo, el VIH se fija a la molécula CD6 mediante la gp120, lo que induciría un cambio de forma de esta glicoproteína.[13] Según los investigadores del Instituto Pasteur, este cambio provocaría la unión del enzima CD26 y del bucle V3, y el «tallado» de este último. Sin embargo, Hovanessian precisa que, por el momento, no existe ninguna prueba directa de tal talla. Pero este mecanismo sería esencial para la fusión, por otra parte necesaria para la infección, de la membrana vírica y la membrana de los linfocitos.

No obstante, ciertas críticas moderan estos resultados. Una de ellas se refiere a los tests utilizados para detectar la entrada del virus en las células. Otra crítica: en los experimentos clave de introducción de los genes de CD4 y CD26, el grupo del Instituto Pasteur no obtiene ninguna integración estable de tales genes; las dos moléculas sólo se producen durante algunos días (se habla de transfección transitoria). Para diversos investigadores, es difícil, en estas condiciones, controlar el nivel de expresión de CD4 y de CD26. Una integración estable de los genes permitiría, colocando las células más tiempo en presencia del virus, verificar que la molécula CD26 es indispensable para la infección vírica. De este modo, podría comprobarse no solamente la entrada del virus en las células infectadas sino también su paso al medio. Según estos investigadores, un test estándar así sería más fiable que el de Hovanessian y sus colegas; necesita cultivar las células en presencia del virus durante un lapso de tiempo suficiente, es decir, varios días. Diversos equipos de todo el mundo se dedican actualmente a verificar los resultados del grupo del Instituto Pasteur.

A CORTO PLAZO, EL INTERÉS DE ESTOS NUEVOS TRABAJOS PARA LA INVESTIGACIÓN CLÍNICA ES MUY DISCUTIDO

La función de la molécula CD26 en la degradación de la envoltura vírica está también sujeta a discusión. Según Michel Pierres, del centro de inmunología de Marsella-Luminy, *«una intervención directa de CD26 en el tallado de la proteína de envoltura gp120 del virus es improbable. En efecto, este enzima es conocido porque actúa sólo en los extremos N-terminales de las proteínas y no en su parte interna, como tendría que ocurrir para que pudiera tallar el bucle V3. La acción de CD26 podría ser indirecta; habría que pensar en la actuación previa de otro enzima asociado a CD26, que degradaría el bucle V3»*. Los investigadores del Instituto Pasteur indican, sin embargo, que el enzima CD26 puede también actuar en el interior de las proteínas, puesto que puede degradar motivos de prolina en péptidos sintéticos y en una gran proteína, el colágeno. Por otra parte, según los equipos de Robin Weiss, del instituto de investigación del cáncer, de Londres, y de Gary Clements, de la empresa Celltech Ltd., de Slough, Gran Bretaña, parece poco probable que un solo enzima con una especificidad única pueda interaccionar con las numerosas cepas de virus existentes:[14] sus trabajos sugieren más bien la intervención de varias proteasas que diferirían según se tratara del VIH-1, el VIH-2 o el SIV.[3]

¿Qué puede decirse de eventuales perspectivas terapéuticas o de vacunas basadas en los resultados del grupo de Hovanessian? Estos investigadores no ocultan su esperanza de preparar, mediante modelización molecular a partir de los inhibidores actuales de la molécula CD26, compuestos terapéuticos capaces de bloquear la entrada del VIH sin perturbar demasiado la actividad catalítica del enzima. La reacción de otros especialistas encierra más reservas. *«Si los resultados de Hovanessian demuestran ser exactos, aportan, evidentemente, un elemento nuevo en la búsqueda de un tratamiento. No obstante, este nuevo enfoque chocará con toda probabilidad con obstáculos idénticos a los que hasta ahora han aparecido cuando se intenta bloquear la unión entre el virus y la molécula CD4, por ejemplo»*, precisa D. Klatzmann. Obstáculos tales como la degradación de los inhibidores en la sangre y la dificultad de transferirlos en cantidad suficiente a las células-diana. Según éste y otros investigadores, los trabajos mencionados no deberían influir en los enfoques actuales centrados en la búsqueda de vacunas. Las regiones constantes de la hélice V3 —entre ellas las descubiertas por el equipo del Instituto Pasteur— podrían, sin duda, ser una diana privilegiada para la elaboración de vacunas dirigidas contra numerosas cepas del VIH. Pero la dificultad consistirá en inducir una respuesta del sistema inmunitario dirigida contra estas regiones constantes.

Los resultados del grupo de Hovanessian, si se confirman, podrían, sin embargo, reavivar la esperanza de llegar a disponer algún día de un buen modelo animal de la infección por virus del sida. En efecto, puede suponerse que ratones transgénicos, en los que se habrían introducido los genes de las moléculas CD4 y CD26 humanos, se harían sensibles a la infección por el VIH y desarrollarían síntomas clínicos. Un modelo así sería enormemente útil para ensayar la acción de compuestos antivíricos y para afinar las estrategias de las posibles vacunas.

JEAN-JACQUES PERRIER
Y LAURE SCHALCHLI

(1) C. Callebaut *et al.*, *Science*, 24 de diciembre, 1993.
(2) A.G. Dalgleish *et al.*, *Nature*, *312*, 763, 1984.; D. Klatzmann *et al.*, *ibid.*, p. 767.
(3) P.R. Clapham *et al.*, *Virology*, *181*, 703, 1991.
(4) C.C. Broder *et al.*, *Virology*, 193, 483, 1993.
(5) J.P. Moore y P.L. Nara, *AIDS*, *5*, S21, 1991.
(6) K.A. Page *et al.*, *J. Virol.*, *66*, 524, 1992.
(7) T. Hattori *et al.*, *FEBS Lett.*, *248*, 48, 1989.
(8) G.L. Clements *et al.*, *AIDS Res. Hum. Retroviruses*, *7*, 3, 1991.
(9) T. Tanaka *et al.*, *J. Immunol.*, *149*, 481, 1992.
(10) A. De Pasquale *et al.*, *Acta Haemat.*, *81*, 19, 1989.
(11) A.G. Laurent *et al.*, *AIDS Res. Hum. Retroviruses*, *9*, 761, 1993.
(12) J.C. Ameisen y A. Capron, *Immunol. Today*, *12*, 102, 1991.
(13) L.E. Leiden y J.D. Lifson, *Immunol. Today*, *13* , 201, 1992.
(14) T.F. Schulz *et al.*, *AIDS Res. Hum. Retroviruses*, *9*, 159, 1993.

EL TICTAC DEL RELOJ DE ARENA

UNA SORPRENDENTE PROPIEDAD DEL RELOJ DE ARENA: EL MOVIMIENTO DE LOS GRANOS PUEDE SER INTERMITENTE.

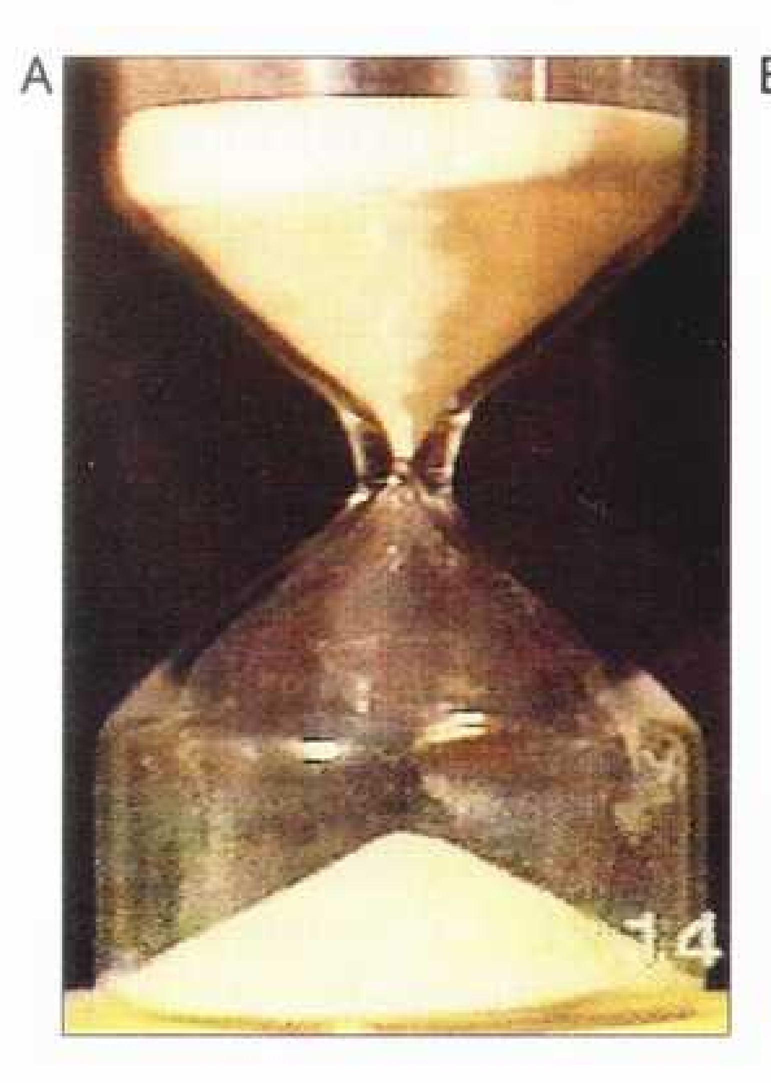
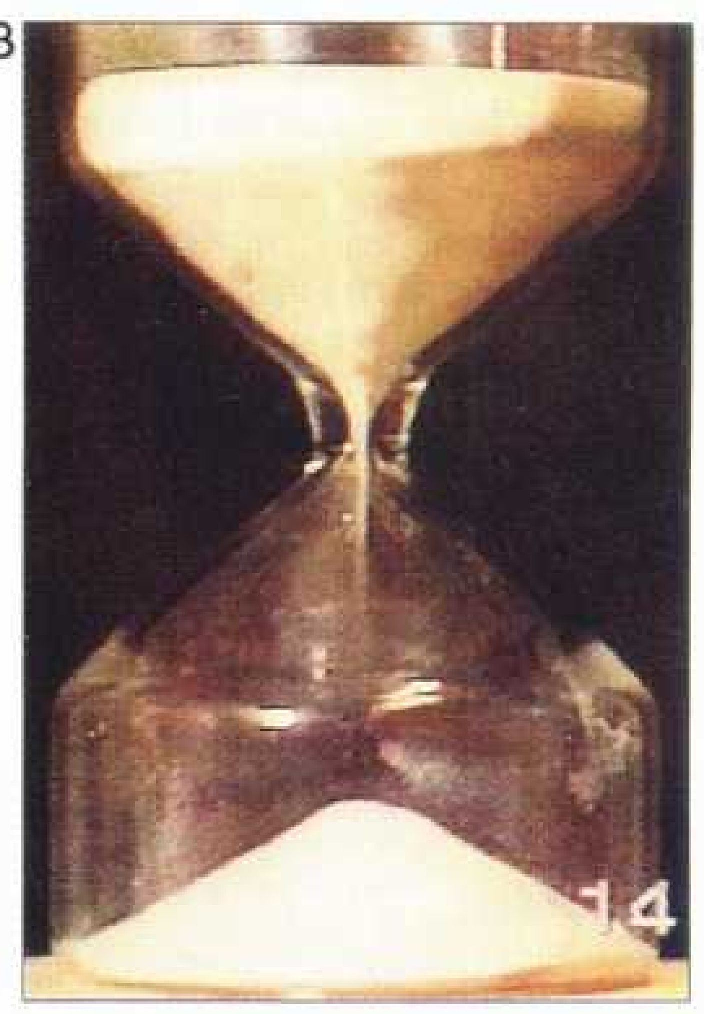
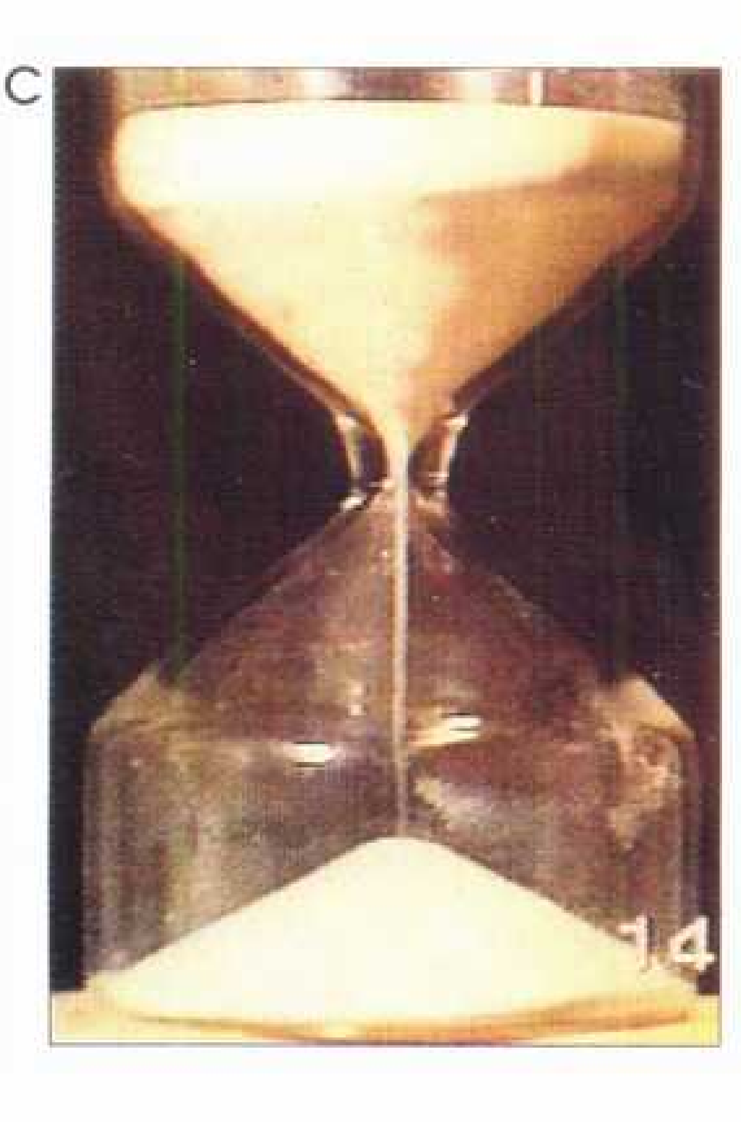
A

B

C


Figura 1. Los autores y sus colegas han descubierto un régimen periódico de caída en un reloj de arena que contiene bolitas de vidrio de tamaño adecuado. Sus experimentos revelan nuevas propiedades, bastante mal comprendidas, de los flujos en medios granulares. Estas fotografías tomadas en instantes sucesivos ilustran el funcionamiento intermitente del reloj de arena. En A, el movimiento está bloqueado como consecuencia de un movimiento de aire, dirigido de la cámara inferior a la superior, que estabiliza momentáneamente una bóveda de bolitas al nivel del cuello. Luego, la difusión del aire va reduciendo la diferencia de presión entre ambas cámaras hasta un umbral en el que el movimiento prosigue (B,C,D); durante esta fase, los granos que caen crean una pequeña diferencia de presión entre las cámaras (del orden de 10-4 atmósferas a favor del compartimiento inferior) que es responsable de un nuevo bloqueo. En F, se ve cómo caen los últimos granos al tiempo que se forma una nueva bóveda a nivel del orificio. La duración del ciclo completo es del orden de dos segundos. (Fotos autores.)



Tomemos un reloj de arena y sustituyamos la arena por agua: constataremos fácilmente que el flujo de agua a través del cuello es proporcional a la altura del líquido que permanece en el recipiente superior. En cambio, si el reloj contiene arena este flujo es independiente de la cantidad de arena restante. Dicha propiedad de la arena, entre otras muchas, ilustra el hecho de que el comportamiento de los medios granulares no es como el de los sólidos ni como el de los líquidos. Por ello, algunos físicos se han visto llevados a considerar el estado granular como un cuarto estado de la materia (véase «La física del estado granular», *Mundo Científico*, nº 132, febrero, 1993).

Se asiste actualmente a un renovado interés por el estudio de los materiales granulares y sus movimientos. Estos fenómenos, que pueden tener gran importancia industrial, por ejemplo para el tranporte de cereales, son bastante mal comprendidos desde el punto de vista fundamental. Por ello, los medios granulares ofrecen a los físicos, armados con los progresos técnicos y conceptuales de la física de la materia desordenada, un vasto campo de exploración.

El reloj de arena, viejo instrumento de medida del tiempo, es objeto de nuevos experimentos. Junto con X.-l. Wu, de la unviersidad de Pittsburgh, Estados Unidos, y K.J. Maloy, de la universidad de Oslo, hemos realizado hace unos meses un experimento de esta clase en la universidad de Rennes I. En él se pone de manifiesto un comportamiento inhabitual: en ciertas condiciones, el flujo de la arena es de naturaleza periódica.(1)

Más generalmente, el experimento hace patente la gran sensibilidad de estos sistemas granulares a las fluctuaciones de las condiciones exteriores.

El reloj que nosotros hemos utilizado está constituido por dos cámaras de 200 ml, llenas de bolitas de vidrio cuidadosamente lavadas y secadas, que se comunican por medio de un orificio de radio igual a 1 mm (fig. 1). Disponíamos de bolitas de diversos diámetros. Según el diámetro elegido, observamos distintos comportamientos del reloj de arena. Si el diámetro es superior a 200 micrómetros, el flujo es regular, de valor constante. Si es inferior a 40 μm, no hay movimiento de caída. Esta inmovilidad puede explicarse fácilmente: por debajo de dicho diámetro, las fuerzas de atracción entre granos (fuerzas capilares, fuerzas de van der Waals, etc.) son del mismo orden de magnitud que el peso de un grano. Se crean entonces bóvedas estables en el estrangulamiento situado entre ambas cámaras y la caída queda bloqueada.

Si el diámetro de las bolitas está comprendido entre 40 y 200 μm, el régimen es sorprendente. Es intermitente, casi periódico. El reloj de arena muestra una alternancia entre fases de movimiento y fases de inmovilidad. Emprendimos el estudio de este régimen sin haber dilucidado completamente el mecanismo o los mecanismos que definen este «reloj interno». Para varios valores del diámetro de las bolitas (entre 41 y 160 μm) medimos la masa total de las bolas caídas en función del tiempo. A tal fin, la base del cámara inferior iba provista de un orificio por el cual las bolitas caían a un recipiente situado en el platillo de una balanza conectada a un microordenador. En las curvas correspondientes se constatan dos tipos de comportamiento según la escala de tiempos considerada (fig. 2).

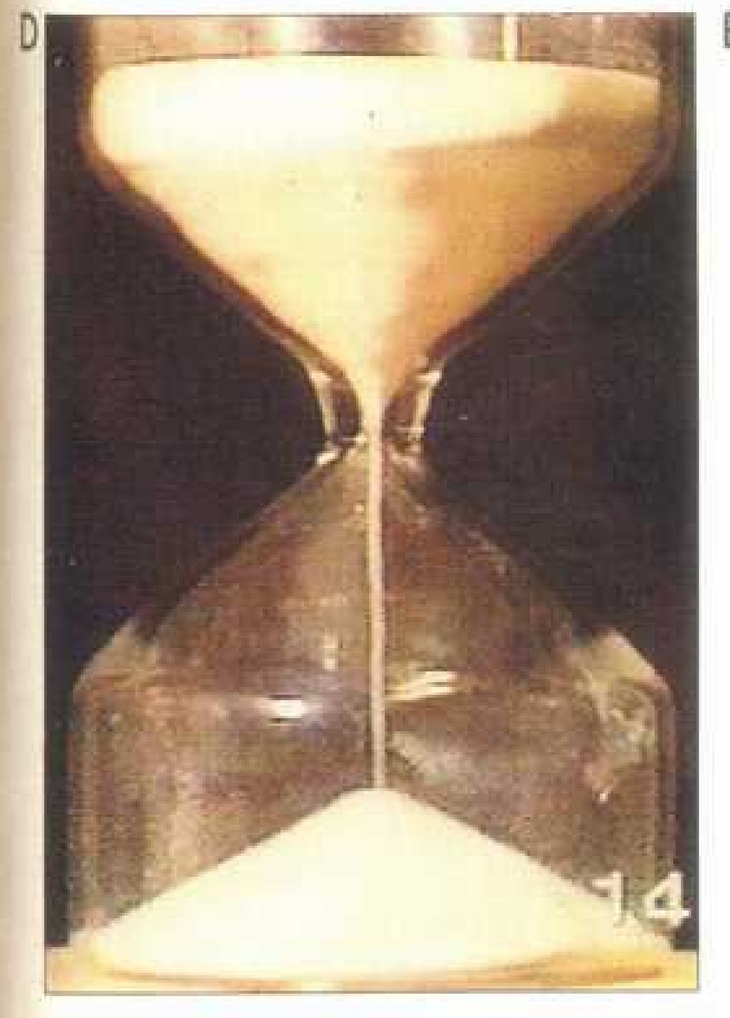
Para tiempos largos (del orden del minuto) se obtiene la propiedad clásica: el flujo no varía con la altura de la arena y, por término medio, la masa caída aumenta linealmente con el tiempo. No obstante, la diferencia de pendiente observada para dos diámetros desiguales está en contradicción con las previsiones teóricas(2) o con las observaciones del funcionamiento «normal» de un reloj de arena, que indican un flujo independiente del tamaño de las bolitas.

Para tiempos cortos (del orden del segundo), el flujo muestra variaciones intermitentes. Durante un tiempo «inactivo» T_i, la masa no varía y el movimiento queda bloqueado; durante un tiempo «activo» T_a hay flujo. La importancia relativa de ambos periodos varía con el tamaño de las bolitas. No obstante, salvo fluctuaciones estadísticas, el periodo total ($T_i + T_a$) no parece variar y su valor medio es de aproximadamente 2,4 segundos. Este comportamiento intermitente todavía no se comprende bien, pese a que nuestros experimentos parecen explicarlo en parte.(1)

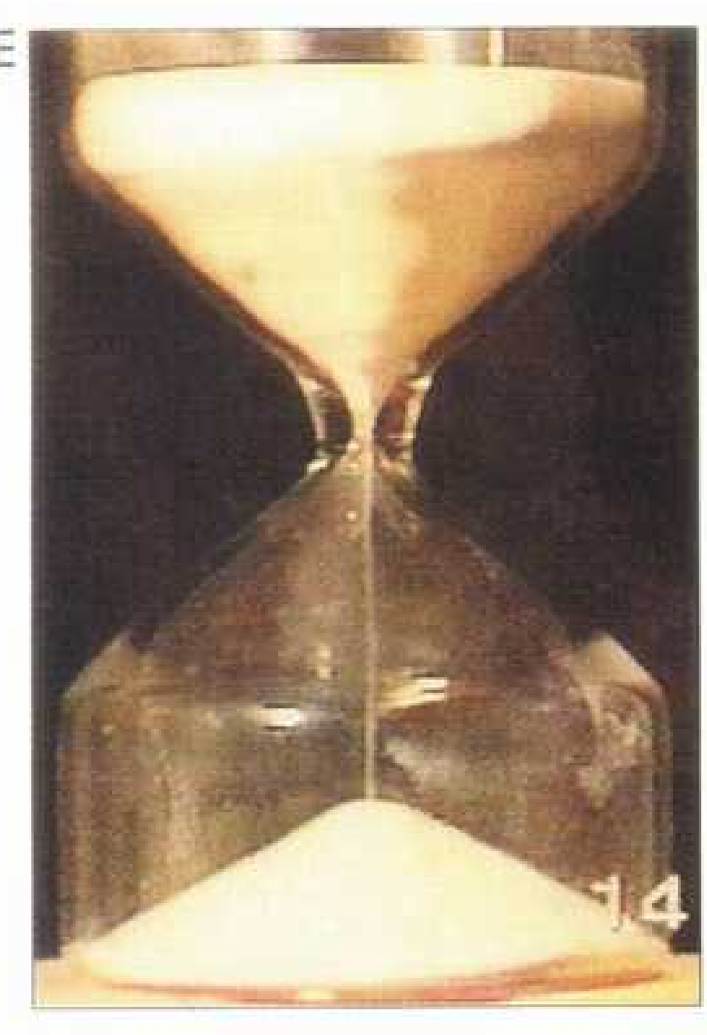
Volvamos para empezar al hecho de que el flujo de un reloj de arena —o el de un silo de cereales, por tomar un ejemplo más industrial— es aproximadamente constante. ¿Cuál es el origen de esta propiedad? Su origen está en el comportamiento híbrido del medio granular, que trasmite las fuerzas de un modo muy distinto a como lo hace un sólido o un líquido.

Si se aplica una fuerza vertical a un medio granular situado dentro de un cilindro cerrado cuya base va provista de un sensor de fuerza, se constata con sorpresa que hasta valores bastante elevados de la fuerza aplicada el sensor mide una fuerza nula. Hay para ello dos razones, descubiertas en los años 1950 por P. Dantu, del Laboratorio central de puen-

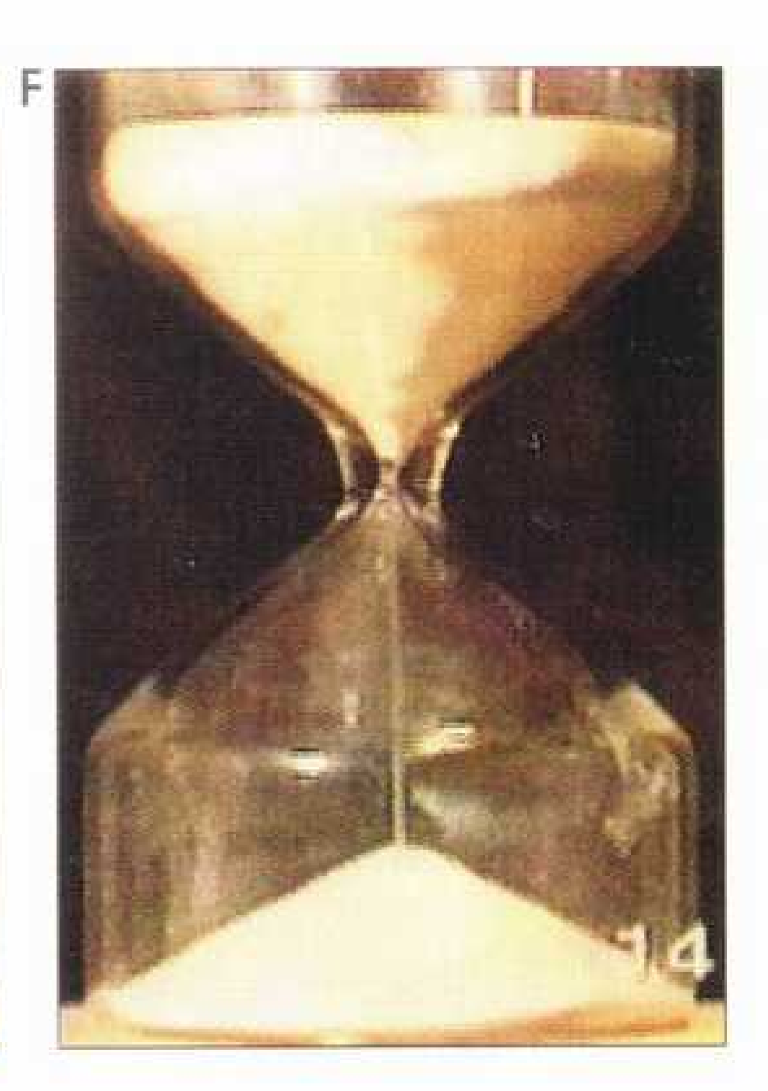
D



E



F



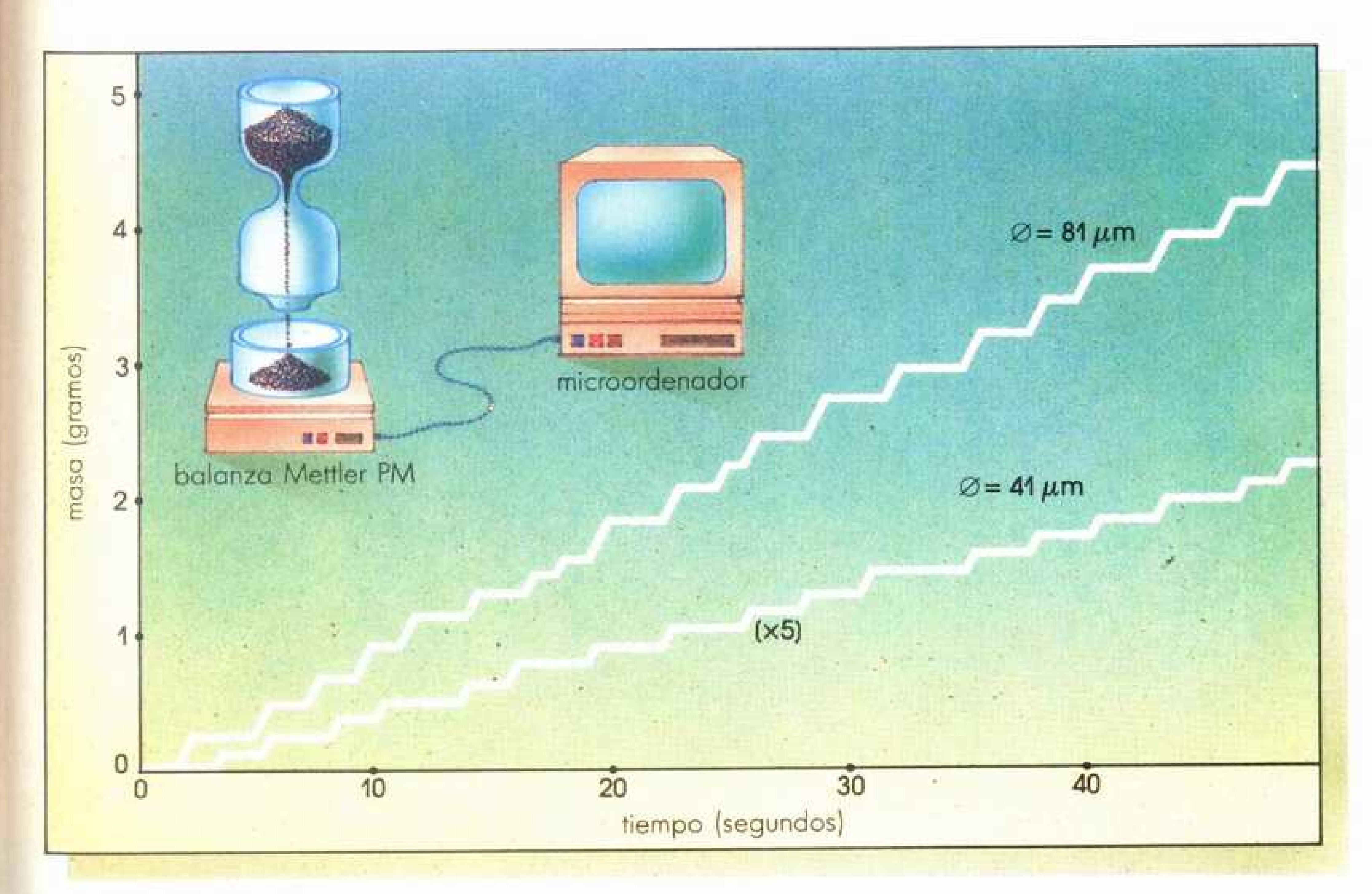


Figura 2. Esta gráfica muestra cómo varía en función del tiempo la masa total caída a la parte inferior del reloj de arena. Las curvas se dan aquí para dos valores del diámetro de las bolitas (41 y 81 micrómetros, con los valores correspondientes a 41 micrómetros multiplicados por 5 para poderlos representar en el mismo gráfico). Una primera propiedad sorprendente es que el flujo (aquí, la pendiente media de la curva) depende fuertemente del tamaño de las partículas, lo cual contradice los resultados teóricos y experimentales relativos al régimen normal de flujo. El origen de este comportamiento puede atribuirse a la fuerte influencia recíproca entre el movimiento de las partículas y el del aire en el que bañan (véase la figura 1). Por otra parte, se pueden definir dos tiempos característicos: un tiempo «activo» T_a durante el cual hay movimiento y un tiempo «inactivo» T_i, caracterizado por un segmento horizontal de la curva. Los dos periodos característicos T_a y T_i varían con el tamaño de las partículas pero el periodo total $T_a + T_i$ parece independiente de este último. Esta propiedad permanece inexplicada.

tes y caminos de París. La transimisión de las fuerzas está bloqueada por dos fenómenos: de una parte, los importantes rozamientos del material contra las paredes; de otra, la formación en el fondo del recipiente de una bóveda que se apoya en los bordes.

Estos dos efectos pueden visualizarse mediante experimentos de fotoelasticidad, durante los cuales el esfuerzo mecánico modifica localmente las propiedades ópticas de un material adecuado. Los rozamientos y la formación de una bóveda explican el que, en un silo que se vacía, o en un reloj de arena, la presión aplicada a los granos situados al nivel del orificio sea debida únicamente al peso de los granos situados debajo de la bóveda. Esta presión permanece pues constante —lo mismo que el flujo— durante casi todo el proceso de vaciado. Lo más sorprendente es la observación de un régimen intermitente, que revela un acoplamiento fuerte entre el flujo de la «arena» y el aire en el que baña. Dos constataciones lo prueban. De una parte, el flujo vuelve a ser continuo cuando se hace funcionar el reloj en el vacío. Por otra parte, cuando ambas cámaras están abiertas hacia el exterior, el flujo también es continuo. El régimen discontinuo sólo se observa cuando al menos una de las dos cámaras está cerrada. Este acoplamiento entre el movimiento de los granos y el gas intersticial, ¿es debido a fuerzas viscosas, como las llamadas fuerzas de Stokes que se ejercen en el caso de la sedimentación de una suspensión? La respuesta es negativa, ya que se demuestra fácilmente que estas fuerzas son despreciables en nuestras condiciones experimentales. ¿Cómo explicar entonces la intermitencia del flujo? Examinemos más de cerca las fluctuaciones de presión dentro de la cámara superior. Cuando los granos se mueven, hay un ligero aumento del volumen libre del compartimiento superior. De ahí deriva una reducción de presión en dicha cámara y por lo tanto una diferencia de presión entre las partes superior e inferior del reloj (del orden de 10^{-4} atmósferas en nuestro caso). La presión mayor del compartimiento inferior atenúa la importancia relativa del peso de las bolitas y favorece la formación de una bóveda que bloquea el movimiento. Luego, la presión de arriba vuelve a aumentar porque la permeabilidad de la arena permite al aire fluir hacia arriba. Digamos de paso que esta permeabilidad es proporcional al cuadrado del diámetro de las bolitas, lo cual explica, en parte al menos, las diferencias de comportamiento en función de dicho diámetro. Disminuye entonces la diferencia de presión, la bóveda se desestabiliza y la caída prosigue. Las variaciones de presión que controlan estas intermitencias son débiles. Por ejemplo, cuando la cámara superior está abierta y la inferior cerrada, el mero calentamiento de esta última con las manos conduce a un aumento de presión que basta para bloquear momentáneamente la caída.

Aunque el origen del comportamiento intermitente del reloj de arena parece bien identificado, no cabe decir lo mismo del hecho —esencial— de que el periodo sea el mismo independientemente del tamaño de las bolitas (al menos para la gama de diámetros considerada aquí). Esto es tanto más sorprendente cuanto que dicho periodo es la suma de dos términos, el periodo inactivo T_i y el periodo activo T_a, que dependen de mecanismos físicos *a priori* muy distintos. Queda todavía un largo trecho por recorrer hasta llegar a comprender un instrumento tan simple como el reloj de arena. No es de extrañar: uno de los especialistas más conocidos en silos, el norteamericano Andrew W. Jenike, afirma que la mejor prueba de lo poco que comprendemos los flujos granulares es el gran número de abolladuras visibles en las paredes de los silos metálicos; cuando el flujo se interrumpe, la mejor manera de desbloquear el silo consiste en golpear las paredes lo más fuertemente posible...

DANIEL BIDEAU, MADANI AMMI Y ALEX HANSEN

(1) X.I. Wu *et al., Phys. Rev. Lett.*, *71*, 1363, 1993.
(2) R.M. Nedderman *et al., Chemical Engineering Science*, vol. *37, 11*, 1597, 1982.

¿VLA 1623, UNA ESTRELLA BEBÉ DE MENOS DE DIEZ MIL AÑOS?

PARA COMPRENDER CÓMO SE FORMAN LAS ESTRELLAS, LOS ASTRÓNOMOS PERSIGUEN DESDE HACE MÁS DE VEINTE AÑOS A LAS PROTOESTRELLAS. UN EQUIPO FRANCO ANGLO NORTEAMERICANO ACABA DE IDENTIFICAR LA MÁS JOVEN DE ELLAS.

Desde hace mucho tiempo, los astrónomos están buscando «protoestrellas», es decir, estrellas que justo acaban de formarse: en cierto sentido estrellas bebés. La manera en que se forman estos objetos fundamentales de la astrofísica que son las estrellas se conoce en sus grandes líneas. Así, se sabe que nacen en el seno de nubes interestelares compuestas por gas (sobre todo hidrógeno) y polvo, como la nube de Rho Ofiuco que es de las más próximas (a sólo 500 años luz de nosotros) y mejor estudiadas (fig. 1). Sin embargo, los detalles del mecanismo que transforma las nubes interestelares, objetos inmensos y poco densos (un tamaño del orden 10^{17} m, una densidad inferior a 10^8 moléculas de hidrógeno por m^3) en estrellas comparables a nuestro Sol todavía son poco conocidos pese a que nuestra comprensión de este fenómeno ha progresado mucho estos veinte últimos años. Faltan dramáticamente las observaciones necesarias para confirmar los modelos, ya que existen muy pocos objetos en el cielo de los que los astrónomos puedan decir con seguridad que se trata de una protoestrella. Esto no tiene nada de sorprendente: las estrellas en formación están profundamente hundidas en unos capullos de gas y de polvo que las hacen invisibles a los telescopios ópticos. Por tanto la caza de las protoestrellas se hace en el intervalo de las longitudes de onda infrarrojas y sobre todo submilimétricas, que sólo es realmente accesible a la observación desde hace algunos años. Derek Ward-Thompson, del Observatorio real de Edimburgo, Mary Barsony, de la universidad de Riverside en California, y yo mismo, en el Centro de estudios de Saclay (CEA), en Francia, hemos realizado este tipo de observaciones con el telescopio JCMT en Hawai, que nos han permitido identificar en la nube de Rho Ofiuco un objeto que quizá sea la más joven protoestrella conocida.(1)



Figura 1. La nube interestelar de Rho Ofiuco es uno de los lugares de formación de estrellas más próximos y mejor conocidos. Visible en las proximidades de Antares, se destaca en oscuro en esta fotografía, obtenida a las longitudes de onda visibles por el telescopio anglo australiano situado en Siding Spring en Australia. En efecto, contiene grandes cantidades de polvo que absorben la radiación visible de las estrellas que allí se han formado (así como la de las estrellas más lejanas situadas en la misma dirección). Por tanto se tiene que recurrir a otras longitudes de onda, especialmente infrarrojas y milimétricas, para estudiarla en detalle. El autor y sus colaboradores han detectado recientemente en esta nube una fuente de radiación milimétrica, asociada a una fuente de radio, VLA 1623. Esta fuente es, sin duda, la más joven de las estrellas recién nacidas que se conocen: su núcleo se habría formado hace menos de diez mil años. (Foto Anglo-Australian Telescope.)

Según el escenario teórico debido en especial a los astrofísicos norteamericanos R. Larson y F. Shu, el proceso que conduce a la formación de una estrella en el seno de una nube de gas interestelar tiene lugar en varias etapas.(2) En la primera, que se podría calificar de «preprotoestelar», se forman grumos de materia en el interior de las nubes que crecen lentamente por el efecto combinado del campo magnético y de la gravedad, hasta alcanzar una densidad comprendida entre 10^{10} y 10^{13} moléculas de hidrógeno por metro cúbico. El tamaño de estos grumos es inferior a unos 10^{15} m, para una masa total de algunas masas solares como máximo, y una temperatura de 10 a 30 kelvin. Durante esta fase, que puede durar varios millones de años, existe en la práctica un casi equilibrio entre la presión del gas, que tiende a dispersar el grumo, y la fuerza de la gravedad, que tiende a condensarlo. Luego, por razones todavía poco conocidas, se rompe repentinamente el equilibrio y el grumo se hunde rápidamente sobre sí mismo por efecto de su propio peso. Al principio, el calor engendrado por la compresión del gas es evacuado por radiación, lo que mantiene una temperatura aproximadamente constante. Pero muy pronto, sin duda menos de diez mil años después del inicio del hundimiento, la densidad en el centro de la condensación resulta tal que el calor producido ya no se puede evacuar. Se forma entonces un núcleo central de una masa inferior a una centésima de la masa solar que se calienta progresivamente hasta una temperatura de algunos miles de grados. De este modo el núcleo alcanza un nuevo equilibrio y unas dimensiones estelares, de unos 10^9 m.

Esto marca el inicio de la fase protoestelar propiamente dicha, ya que el núcleo constituye el embrión que se convertirá en la futura estrella. La mayor

parte de la materia del grumo inicial se encuentra entonces en forma de una envoltura, o «capullo», que cae sobre el núcleo central. En este proceso, la envoltura, al principio muy fría, se vuelve cada más más caliente. Cuando el núcleo ha acumulado toda la materia del capullo, se acaba la fase protoestelar —que ha durado de diez mil a cien mil años— y se entra en una fase en la que las estrellas reciben el nombre genérico de estrellas T Tauri, debido al nombre de la primera estrella de este tipo descubierta en la constelación de Tauro. Éstas se contraen lentamente en el curso de uno a diez millones de años hasta que su temperatura central alcanza los diez millones de grados necesarios para iniciar las reacciones nucleares de fusión del hidrógeno en helio. Empieza entonces la fase de las estrellas «adultas» llamada secuencia principal, en la que se encuentra el Sol desde hace unos cinco mil millones de años. Éste es el escenario imaginado por los teóricos. La nube de Rho Ofiuco, verdadero semillero de estrellas, proporciona un excelente laboratorio para intentar verificar esta teoría con observaciones y estudiar directamente las estrellas bebés. Utilizando observaciones infrarrojas realizadas desde el suelo y desde el espacio (con el satélite IRAS *—Infra Red Astronomical Satellite—* un equipo de astrónomos norteamericanos contabilizó, en 1989, más de un centenar de estrellas jóvenes en esta nube.[3] Estas estrellas están problamente en diferentes fases de evolución, y si se logra clasificarlas en una secuencia evolutiva, se puede esperar reconstruir el «filme» de su gestación. Una idea natural es utilizar la cantidad de materia circumestelar, y su temperatura, como medidas de su estado de evolución. Se espera que las protoestrellas más jóvenes tengan las envolturas más masivas y más frías. Por tanto, lo que falta es encontrar indicadores fiables de la masa y de la temperatura.

En este campo se ha realizado hace poco un progreso decisivo con el advenimiento de los grandes telescopios milimétricos y submilimétricos como la antena de 30 metros de diámetro del IRAM (Instituto de radioastronomía milimétrica, hispano germano francés) situado en el pico Veleta en España, y el JCMT (*James Clerk Maxwell Telescope*, anglo holandés canadiense) de 15 metros en Mauna Kea, en Hawai. A estas longitudes de onda, la radiación térmica emitida por el polvo es directamente proporcional a la cantidad de materia emisora. A condición de conocer la emisividad del polvo y la composición relativa de la materia en gas y en polvo, se dispone de una herramienta muy potente para medir las masas de materia presentes alrededor de las estrellas jóvenes. Con Thierry Montmerle del Centro de estudios de Saclay, acabamos de utilizar este método de forma sistemática en la nube de Rho Ofiuco.[4] Estas observaciones, realizadas por medio del radiotelescopio del IRAM, nos han permitido demostrar, en primer lugar, que la mayoría de las fuentes infrarrojas detectadas por IRAS ya son realmente estrellas (jóvenes). En efecto, han acumulado en su centro la mayor parte de su masa final (es decir, de 0,3 a 2 masas solares para una estrella T Tauri típica) y ya sólo están asociadas a residuos de envolturas, a lo sumo de 0,1 masas solares. Sin embargo, las observaciones de la nube también han revelado un puñado de nuevas fuentes compactas, muy brillantes a las longitudes de onda milimétricas pero invisibles en el infrarrojo (fig. 2).[1,5] En particular, estas fuentes no han sido detectadas por IRAS.

Una de estas fuentes es particularmente interesante. Coincide con la fuente radio VLA 1623 que habíamos detectado en 1987 gracias al interferómetro norteamericano VLA (*Very Large Array*). También sabíamos, por observaciones de la molécula de monóxido de carbono efectuadas en 1988 con el telescopio del IRAM, que VLA 1623 está en el centro de dos chorros de materia eyectada en direcciones opuestas.[6] Tales chorros, llamados dipolares, que no estaban en absoluto previstos por las primeras teorías de formación de estrellas, se reconocen ahora como una característica de las estrellas más jóvenes.[2] Se cree que están alineados con eje de rotación de las protoestrellas y que permiten que éstas se desembaracen del exceso de energía y de momento cinético consecutivo a su formación. En cualquier caso, la presencia de estos chorros y de una fuente de radio compacta en el centro indica que VLA 1623 posee verosímilmente un núcleo estelar, a diferencia de las otras fuentes detectadas en el IRAM que tienen más bien propiedades «preprotoestelares». La emisión milimétrica observada procedente de VLA 1623 muestra que este objeto posee una envoltura de alrededor de 0,6 masas solares por dos mil unidades astronómicas de diámetro, es decir, el equivalente de veinte veces el tamaño del sistema solar actual. Con Derek Ward-Thompson y Mary Barsony, hemos podido medir la emisión de esta envoltura entre 0,35 y 1,1 mm gracias al telescopio JCMT, y establecer así que radía como un cuerpo calentado a una temperatura de unos 20 kelvin.[1] Esta temperatura exterior, más baja que la de todas las otras fuentes infrarrojas de la nube (que varía entre algunas decenas y algunos miles de grados), sugiere que el núcleo estelar central todavía no ha llegado al estadio de T Tauri. La potencia total radiada por el sistema tiene probablemente un origen puramente gravitatorio. En esta hipótesis, el valor medido de esta potencia, que es comparable a la del Sol, implica un núcleo central muy poco másico: menos de 0,1 masas solares, netamente inferior a la masa del capullo.

Debido a que es la más brillante en el intervalo milimétrico, lo que indica la envoltura más masiva, y a que es la más fría, VLA 1623 es claramente la más joven de las fuentes estelares conocidas hasta ahora en el centro de la nube de Rho Ofiuco. La comparación de las propiedades de VLA 1623 con las predichas por el escenario teórico corrientemente aceptado sugiere que solamente han transcurrido algunos miles de años desde la formación del núcleo estelar central. Por tanto, se trata, sin duda, de una auténtica protoestrella. En todo caso, es el prototipo de una nueva clase de objetos extraordinariamente jóvenes. Con objeto de evaluar plenamente el grado de concordancia entre la teoría y la observación, falta ahora detectar directamente la caída de la envoltura sobre el núcleo, pero esto es otra historia...

PHILIPPE ANDRÉ

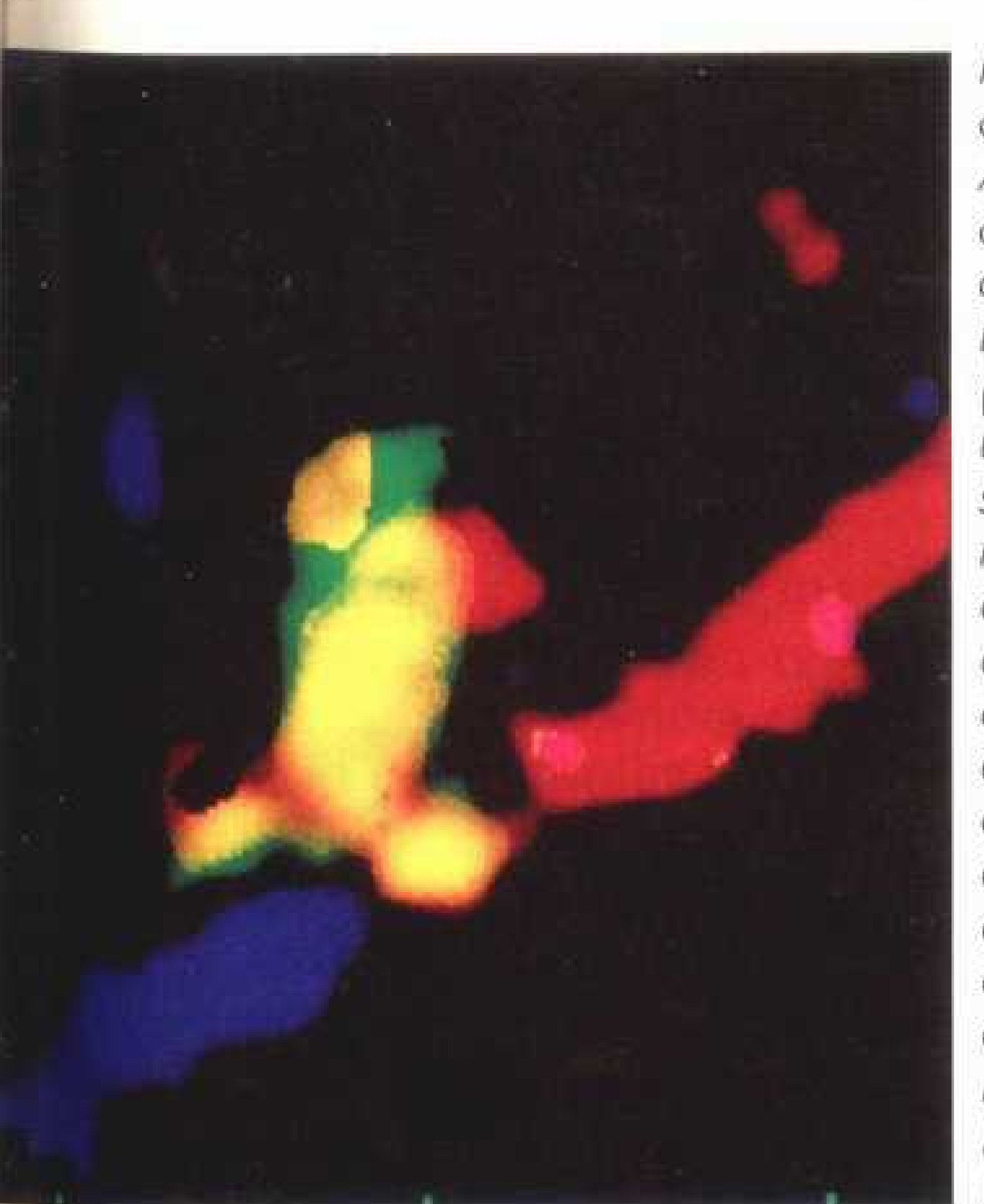
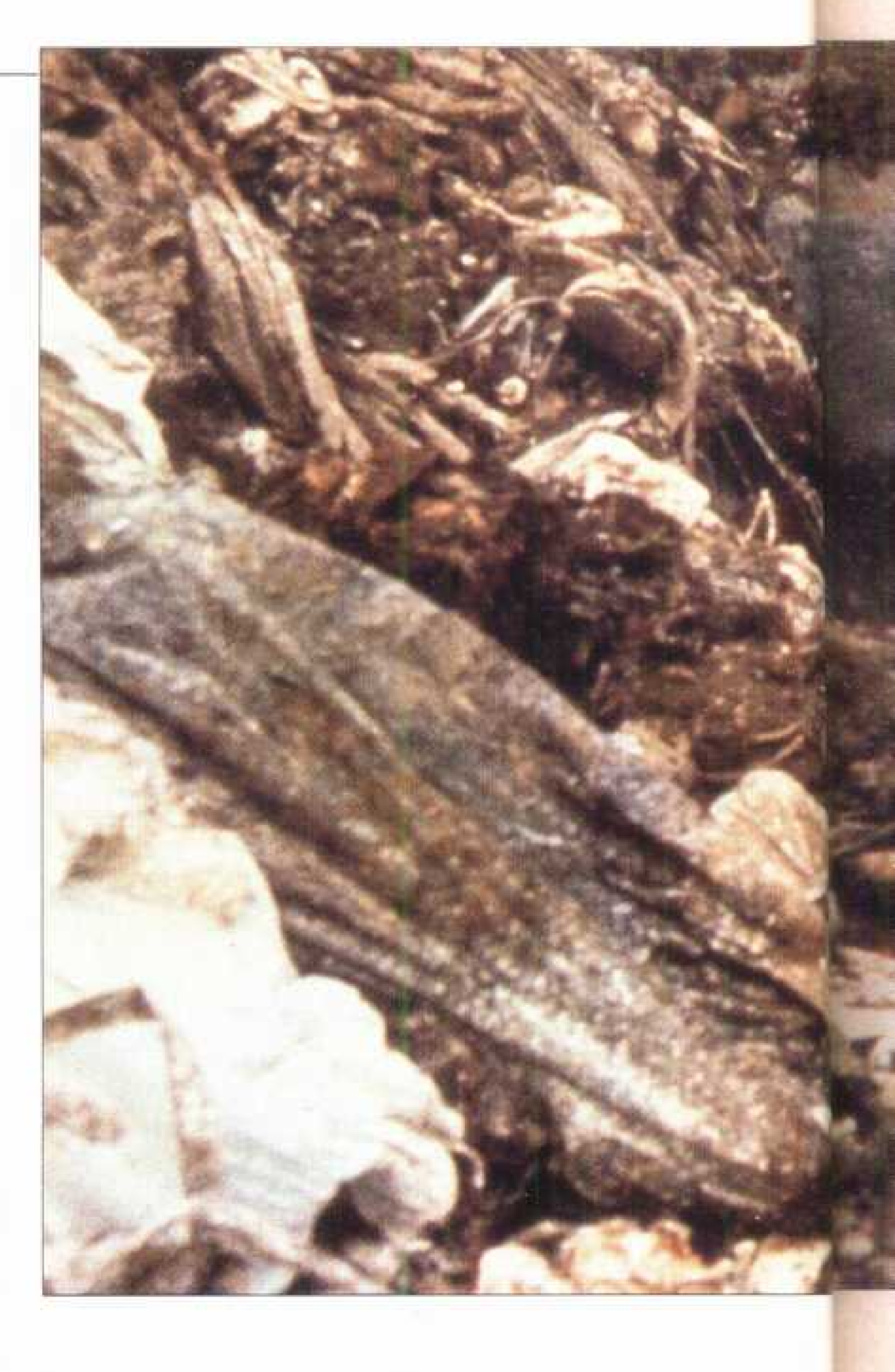


Figura 2. «Rho Ofiuco A» es una de las regiones más densas y más oscuras de la nube de Rho Ofiuco. Aquí, se ha cartografiado a 1,3 milímetros de longitud de onda por medio de radiotelescopio de 30 metros del Instituto de radioastronomía milimétrica (IRAM), en España. Utilizando un receptor muy sensible (bolómetro), se puede detectar la radiación térmica de un polvo tan frío como una decena de kelvin, que sólo emite a longitudes de onda superiores a 0,3 milímetros. En esta imagen milimétrica aparecen varias condensaciones en amarillo. La más circular de ellas, asociada a la fuente de radio VLA 1623, está en el centro de una concentración de materia que se escapa en dos direcciones opuestas. Los dos lóbulos de esta condensación están representados aquí en azul y en rojo, tal como han aparecido en una cartografía de la molécula de monóxido de carbono efectuada con el mismo radiotelescopio. La fuerte emisión observada a las longitudes de onda milimétricas, y la presencia de esta condensación, son la firma de una protoestrella extraordinariamente joven. (Foto P. André/CEA-Saclay.)

(1) P. André *et al.*, *Astrophys. J.*, *406*, 122, 1993.
(2) R. Larson, *Ann. Rev. Astron., Astrophys.*, *11*, 219, 1973; F. Shu *et al.*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, *25*, 23, 1987.
(3) B. Wilking *et al.*, *Astrophys. J.*, *340*, 823, 1989.
(4) P. André y T. Montmerle, *Astrophys. J.*, en prensa.
(5) P. Mezger *et al.*, *Astron. Astrophys.*, *265*, 743, 1992.
(6) P. André *et al.*, *Astron. Astrophys.*, *236*, 180, 1990.

DESCONTAMINAR LOS SUELOS POR MEDIO DE UN CAMPO ELÉCTRICO

¿CÓMO ELIMINAR LOS CONTAMINANTES DE UN SUELO ARCILLOSO? UN NUEVO PROCEDIMIENTO RECURRE A UN CAMPO ELÉCTRICO



Los lugares contaminados pueden ser antiguos vertederos, como en la foto, o depósitos industriales de residuos tóxicos. Las extracciones realizadas en dichos lugares permiten el análisis fisicoquímico de los desechos, necesario para elegir la técnica de tratamiento más adecuada. Dejando aparte las medidas de confinamiento, se han ideado un gran número de técnicas para retirar los contaminantes del suelo: extracción a vacío, tratamiento biológico, procedimientos térmicos, etc. No obstante, en un suelo de pequeña porosidad, como un suelo arcilloso, estas técnicas son poco eficaces. Para facilitar la migración del contaminante hacia el lugar de bombeo, los investigadores proponen una nueva tecnología basada en el establecimiento de un campo eléctrico en el suelo, mantenido por medio de electrodos conectados a un generador. Se inyecta una solución destinada a purgar el suelo cerca de un electrodo (el ánodo) y un colector recoge este líquido y el contaminante en el otro lado (en el cátodo). El contaminante ha de ser una molécula pequeña, orgánica o metálica, pero no necesariamente soluble. Esta técnica se ha experimentado sobre todo a pequeña escala, en el laboratorio. Sus posibilidades de desarrollo se están estudianto en Francia. (Foto Géoclean.)

Para descontaminar los suelos se utilizan técnicas muy diversas: extracción a vacío, tratamiento biológico, procedimientos térmicos, etc. Pero estas técnicas no son muy satisfactorias en los suelos de textura fina, como los suelos arcillosos, a causa de la débil porosidad de estos últimos. Un nuevo procedimiento, expuesto recientemente por investigadores norteamericanos del Massachusetts Institute of Technology, podría colmar esta laguna.(1) Consiste en crear un campo eléctrico en el suelo por medio de pares de electrodos. El contaminante, que ha de ser una molécula pequeña, soluble o no, se desplaza hacia uno de los polos del campo eléctrico, donde es bombeado. Este método presenta otra ventaja: no requiere la excavación de los terrenos contaminados, lo cual podría limitar los costes de utilización y, sobre todo, los riesgos de exposición de los trabajadores a los contaminantes.

El estudio experimental, realizado a pequeña escala, en el laboratorio, ha permitido determinar las condiciones de aplicación del procedimiento a diversos contaminantes, moléculas pequeñas o iones metálicos.

La presencia en un suelo de contaminantes (hidrocarburos, disolventes clorados, metales pesados, etc.) puede ser de origen accidental, estar ligada a la acumulación de desechos tóxicos en las descargas o depósitos industriales, o simplemente estar relacionada con la actividad industrial. Recuentos efectuados en Alemania y Países Bajos revelan la existencia de ochenta mil y veinticinco mil lugares contaminados en cada uno de estos países. En Francia, donde se está elaborando un recuento, una decena de empresas especializadas tratan unos sesenta emplazamientos anuales.

Estas empresas pueden proponer medidas de confinamiento que permiten, por ejemplo, aislar un depósito de residuos tóxicos para evitar la dispersión de los contaminantes en el medio. Pero otra intervención posible, más costosa, es la extracción del contaminante.

Cuando la contaminación es intensa y está localizada, la masa contaminada se extrae antes de ser tratada. Si el tratamiento tiene lugar *in situ* se pueden emplear varias técnicas. Entre los *procedimientos fisicoquímicos*, el lavado del suelo, practicado sobre todo en Países Bajos y en Alemania, se aplica a todo tipo de contaminantes, orgánicos y metales pesados, pero sólo es practicable en suelos de textura grosera (arena, por ejemplo). Otra técnica, más utilizada en Francia, es la extracción a vacío por depresión del suelo. Debido a la baja de presión, el contaminante es volatilizado y luego aspirado, recogido y tratado. Esta tecnología no requiere excavación pero sólo es aplicable a los contaminantes volátiles, con el riesgo de que éstos queden atrapados en los poros más finos del suelo. La volatilización puede conseguirse también con un calentamiento del suelo después de realizada la excavación. Los *procedimientos térmicos* conciernen sobre todo a las sustancias orgánicas, pero también a ciertos metales volátiles.

El *tratamiento biológico* de los suelos, frecuentemente utilizado en Francia, utiliza la capacidad de ciertas bacterias para consumir y degradar sustancias orgánicas nocivas para el medio, especialmente hidrocarburos ligeros (benceno, por ejemplo). No obstante, los procesos de biodegradación son lentos y el tratamiento puede ser largo.

EXTRAER O NO EXTRAER: ÉSTA ES LA CUESTIÓN

En realidad, cada una de las técnicas citadas presenta un gran número de variantes, ya que la empresa, después de realizar estudios previos, tiene que adaptar las técnicas a las condiciones específicas de cada lugar (véase la figura). No obstante, cualquiera que sea la tecnología adoptada, la extracción sigue siendo difícil en un suelo de escasa porosidad, lo cual justifica la búsqueda de nuevos sistemas. La propuesta de los investigadores del MIT trata de responder a este problema.

La migración del contaminante en el seno de un campo eléctrico puede explicarse por dos mecanismos: la electromigración, que es un simple transporte de iones en solución, y la electroósmosis. Este último fenómeno se produce en el suelo debido a que los finos elementos de éste, los coloides orgánicos y arcillosos, suelen estar cargados negativamente. Una delgadísima capa fluida (de 1 a 10 nm de espesor), cargada positivamente, los recubre a fin de compensar la carga y asegurar la neutralidad eléctrica. Cuando se crea un campo eléctrico en el suelo, este fluido (o «doble capa») se mueve hacia el cátodo (polo negativo) paralelamente al campo eléctrico. Las fuerzas que intervienen (eléctrica y de viscosidad) producen un movimiento de conjunto del fluido, que ocupa el espacio libre entre los coloides. El movimien-



to de la fracción líquida del suelo (que contiene el contaminante, en solución o no) tiene lugar en dirección al cátodo siempre que el suelo esté saturado de agua. Por ello, una solución que sirva para purgar el suelo se ha de inyectar del lado del ánodo, mientras que el colector recoge este líquido y el contaminante del lado del cátodo. La solución puede ser simplemente agua o tener una composición específica determinada por la experimentación. A estos mecanismos se añaden otros efectos indirectos. En paticular, el bombeo del producto a nivel del cátodo provoca una disminución local de su concentración y el producto es atraído, por difusión, hacia este electrodo. Por otra parte, veremos más adelante que una variación de pH entre los electrodos puede modificar la transferencia de contaminante.

Para determinar en qué medida la electroósmosis puede aplicarse a la descontaminación de los suelos, P. Shapiro, P.C. Renaud y R.F. Probstein han utilizado un modelo experimental.(2) Se trata de un cilindro de plástico de cincuenta centímetros de longitud por diez de diámetro lleno de una arcilla saturada de contaminante. A cada lado se colocan unos electrodos conectados a un generador. El modelo permite evaluar el efecto de diversos parámetros sobre la velocidad de progresión del líquido en el suelo (y por lo tanto sobre la duración del proceso) así como sobre el porcentaje de contaminante extraído.

En una primera etapa, se experimentó con dos contaminantes orgánicos: el ácido acético y el fenol. El índice de recuperación de estos contaminantes varía en función de su concentración inicial y de la diferencia de potencial aplicada entre los electrodos. Por ejemplo, el de ácido acético extraído es del 95 % cuando su concentración inicial es de 0,5 mol por litro, mientras que es sólo del 42 % para una concentración de 0,1 mol por litro. Para optimizar el procedimiento, esta variación de rendimiento debe ser suprimida. El efecto de la concentración del contaminante podría explicarse por su influencia sobre el pH de la solución en movimiento. En efecto, para una concentración inicial débil de ácido acético, el pH del medio aumenta a nivel del cátodo, donde la hidrólisis del agua produce iones hidroxilo (OH^-). Entonces el ácido acético se disocia y el ion acetato, cargado negativamente, refluye hacia el ánodo. Para impedir este proceso, los investigadores norteamericanos proponen modificar la composición del líquido utilizado para purgar el suelo. Por medio de un modelo experimental de tamaño más reducido (un cilindro de arcilla de 4 cm de longitud), Shapiro y Probstein han experimentado con soluciones (a 0,01 mol por litro) de sal (pH 7), de sosa (pH 12) y de ácido clorhídrico (pH 2), para purgar la arcilla y extraer de ella el fenol.(3) El empleo de una solución básica acelera la extracción de este contaminante, lo cual demuestra la importancia del pH de la solución. La utilización de una solución no tóxica, pero que permite tamponar las variaciones de pH, determina pues la eficacia del método.

También se ha probado utilizar un campo eléctrico para extraer metales contaminantes (cinc, plomo, cobre, etc.). El método se aplica sólo a los metales en solución, pero al estar los iones metálicos cargados positivamente, el flujo electroosmótico aumenta mucho por electromigración de estos cationes hacia el cátodo. A pesar de todo, R.F. Probstein y R.E. Hicks, por medio de un modelo experimental, demuestran que un pH elevado en las proximidades del cátodo puede provocar la precipitación del metal entre los electrodos. Esta propiedad podría utilizarse para concentrar el metal en una región del suelo y facilitar su retirada por excavación. Pero también se puede impedir la precipitación del metal y permitir su bombeo en solución, ya que el aumento del pH puede limitarse mediante un lavado con agua del suelo, a nivel del cátodo. Con este sistema, los investigadores recuperan en nueve días el 98 % del cinc contenido inicialmente en el cilindro experimental.(1)

Los investigadores del MIT han recurrido también a un modelo matemático que describe el comportamiento de un soluto en un campo eléctrico teniendo en cuenta los diversos procesos que interfieren: electroósmosis, electromigración y difusión. De este modo, los investigadores han logrado precisar los parámetros a respetar para lograr el transporte de contaminante en el suelo: los electrodos se han de situar a una profundidad comprendida entre dos y diez metros y han de estar a una distancia mutua de unos diez metros; la diferencia de potencial aplicada entre los electrodos está comprendida entre 40 y 200 V. Se ha de mantener una circulación de solución tampón para que el suelo se mantenga saturado. Sin embargo, diversos problemas limitan las posibilidades de aplicación de esta técnica. En efecto, la electroósmosis, que permite el movimiento de moléculas eléctricamente neutras, sólo se da en terrenos de pequeña porosidad (arcilla, limo, arena arcillosa) y en condiciones de saturación permanente. El método, además, no permite la retirada de moléculas pequeñas tales como los hidrocarburos pesados, por lo que se aplica sólo a los compuestos aromáticos (benceno, tolueno, xileno) a los compuestos fenólicos y a los disolventes clorados. Por lo que respecta a los metales, su solubilidad podría ser alterada por la presencia de otros iones (por ejemplo, iones bicarbonato) en el agua subterránea. Además, en un medio poco permeable, la migración del contaminante podría ser débil en ausencia de toda intervención y el contaminante podría dejarse en el lugar, tal vez sin gran daño para el medio ambiente (no contaminación de capas freáticas, por ejemplo). Por ello, para Richard Modolo, director científico de la empresa Gedean, filial del grupo SITA, «*el problema esencial a resolver antes de desarrollar esta tecnología consiste en determinar cuál es el riesgo mínimo: dejar el contaminante en el lugar, «atrapado» en la arcilla, o tratar de extraerlo*».

PIERRETTE HABERT

(1) R.F. Probstein y R.E. Hicks, *Science, 260*, 498, 1993.
(2) A.P. Shapiro *et al.*, *PCH Physico-chemical Hydrodynamics, 11*, 785, 1989.
(3) A.P. Shapiro y R.F. Probstein, *Environ. Sci. Technol., 27*, 283, 1993.

¿SE LEVANTA POR FIN EL VELO DE LA MASA OCULTA?

LAS NUEVE DÉCIMAS PARTES DE LA MASA DEL UNIVERSO SE ESCONDEN DE LOS ASTRÓNOMOS. ESTE ENIGMA TENAZ QUIZÁS ACABA DE CEDER: LA MASA OCULTA ESTARÍA CONSTITUIDA, POR ESTRELLAS FALLIDAS.



Figura 1. Una gran parte de la masa del Universo es invisible ya que no es luminosa. Parece claro que nuestra galaxia, en concreto, está sumergida en un «halo» esférico de esta inaprehensible materia oculta. ¿Cúal es su naturaleza? Si se trata de materia ordinaria, esta materia oscura está sin duda en forma de enanas marrones, unos astros demasiado poco másicos para convertirse en estrellas. Para detectarlos, la idea consiste en observar una estrella de una galaxia próxima como la Gran Nube de Magallanes de la que aquí se ve una fotografía. Si una enana marrón del halo de nuestra galaxia pasa por delante de ella, la imagen de la estrella se amplificará debido a un efecto de lente gravitatoria. Dado que este alineamiento es muy poco probable, se tienen que vigilar varios millones de estrellas. Es realizando una vigilancia de este tipo como dos equipos, uno francés y el otro australiano norteamericano, creen haber detectado, uno el segundo y dos el primero, dos acontecimientos de microlente. Se deberían a enanas marrones de alrededor de 0,1 masas solares. Un tercer equipo, norteamericano polaco, ha observado una amplificación del mismo tipo en una estrella del centro de nuestra galaxia. (Foto Barney Magrath/Cosmos.)

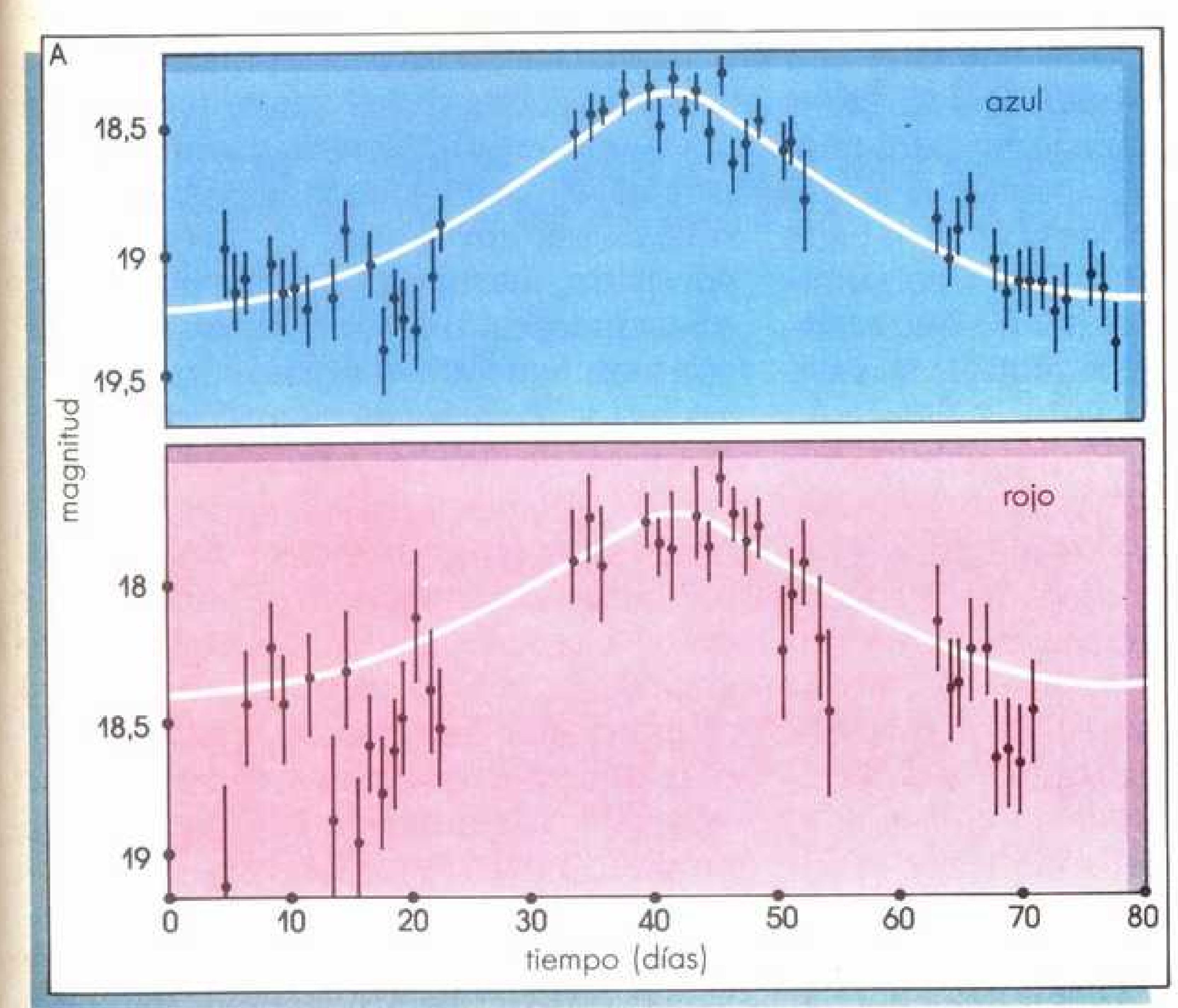
Desde hace unos buenos sesenta años, los astrónomos chocan con el problema de la «masa oculta» del Universo. Esta oscura historia se remonta a 1933, cuando el astrónomo suizo F. Zwicky, al observar la distribución de las velocidades de las galaxias en el gran cúmulo de Coma, llegó a la conclusión de que las galaxias no representan más que la décima parte de la masa total del cúmulo. ¿Dónde se esconden las nueve décimas restantes? Se presentó una denuncia contra persona desconocida que fue desestimada por falta de pruebas. Se escribía así la primera página de una apasionante investigación científica. Estos últimos años, se ha reanudado la instrucción: han aparecido nuevos querellantes, apoyados por nuevas observaciones y por los progresos de la cosmología y de la física de partículas. Pero los resultados de observaciones publicados el pasado mes de octubre por tres equipos diferentes sugieren que unos astros oscuros de una masa unas diez veces menor que la del Sol son los responsables de una parte de la masa oculta.

Tenemos que hacer profesión de humildad: el Universo visible, es decir, el directamente accesible por la luz que emite, no basta para dar cuenta de los efectos dinámicos que observamos. Se le tiene que añadir un compañero, el Universo oscuro. Todas las escalas astronómicas están afectadas. Por ejemplo, en lo que concierne a los diferentes tipos de galaxias espirales, la medida de sus curvas de rotación muestra que a gran distancia del centro galáctico, las velocidades de rotación siguen siendo elevadas y casi constantes, lo que está en completa contradicción con la distribución de masa luminosa que se observa. Con objeto de reconciliar la teoría y las observaciones, se supone que existe un halo esférico de gran tamaño en el que está sumergida la galaxia luminosa.

El acusado sigue sin aparecer, pero la lista de sospechosos es larga. Se pueden clasificar en dos grandes categorías: materia ordinaria llamada bariónica, compuesta fundamentalmente por neutrones y protones, y materia no bariónica, compuesta por partículas a identificar agrupadas bajo el término genérico de WIMPS (por *Weakly Interacting Massive Particles*). Sin embargo, los cálculos de formación y de abundancia de los elementos ligeros (hidrógeno, helio y litio) en el marco de un modelo cosmológico estándar prevén una densidad de materia bariónica más elevada que la observada en forma de estrellas y de gas. Por tanto, una parte importante de los bariones podría ser no luminosa. Sin embargo, la palabra la tienen los experimentadores y observadores; pero éstos no tienen fácil la tarea ya que los candidatos más probables no son los más fáciles de detectar.

Supongamos que el halo de nuestra galaxia existe y que está constituido por materia ordinaria; de todos los candidatos posibles, los más probables de los que restan en liza son las enanas marrones (los otros candidatos ya se habrían detectado). Se trata de objetos compactos y no luminosos, de masa superior a unas 10^{-7} masas solares (sino se evaporarían) e inferior a unas 0,1 masas solares (sino se habrían iniciado las reacciones termonucleares para dar origen a verdaderas estrellas que se habrían observado). ¿Cómo detectar tales objetos? En 1986, el astrónomo polaco B. Paczynski, que trabajaba en la universidad de Princeton, desarrolló una idea ya propuesta, con escepticismo, por Einstein en 1936: el efecto de microlente gravitatoria.[1,2]

La idea general es que un objeto compacto y masivo como una enana marrón tiene que «curvar» la trayectoria de la



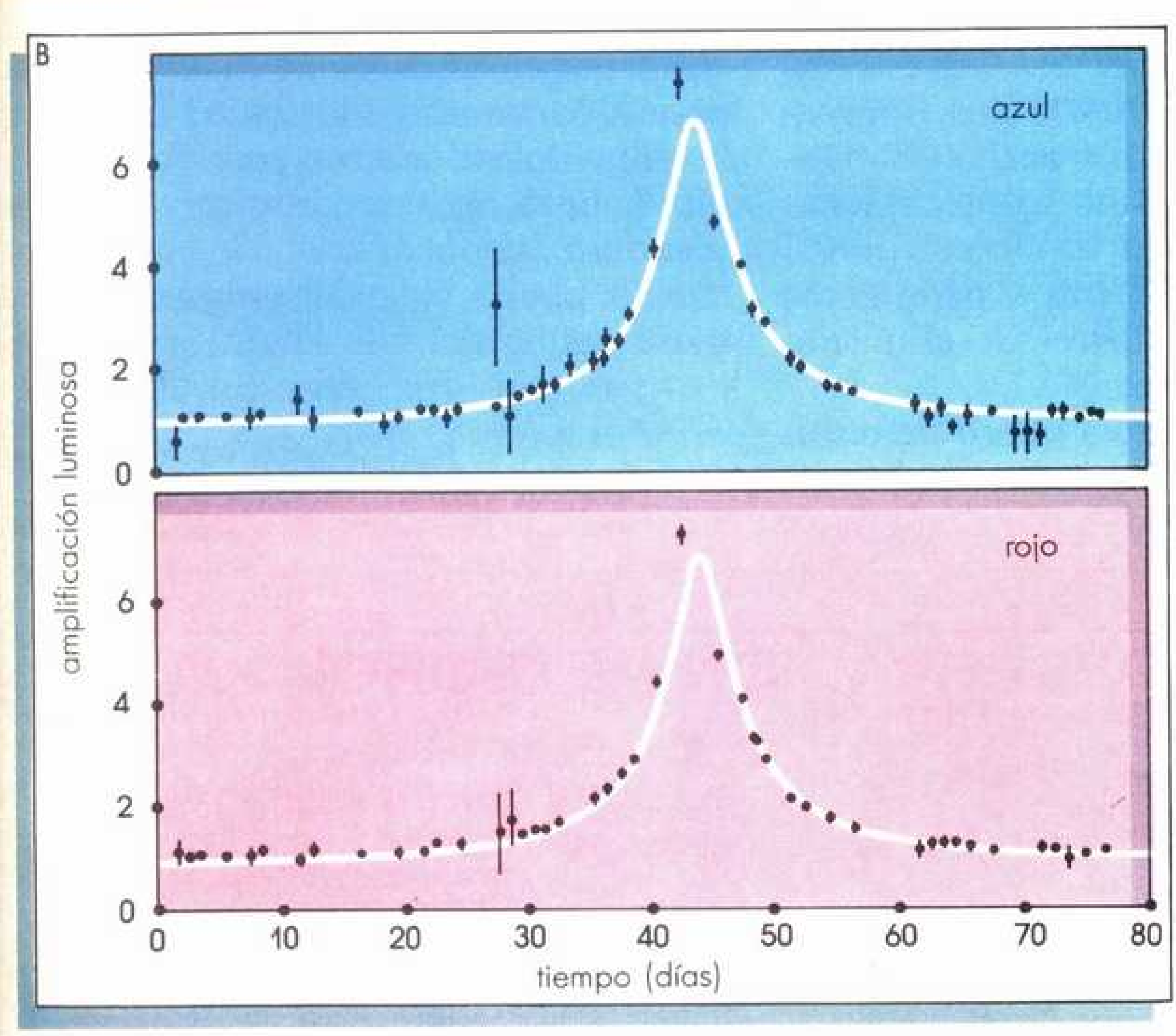


Figura 2. El efecto de microlente gravitatoria amplifica la luz de la estrella observada durante un intervalo de tiempo tanto mayor cuanto más grande es la masa del deflector. Las curvas de luz aquí reproducidas (en A, la de uno de los acontecimientos del equipo francés EROS*; en B la del equipo australiano norteamericano* MACHO*) son simétricas: el decrecimiento presenta el mismo aspecto que el aumento de luz. Además son idénticas en el rojo y en el azul. Por tanto, es probable que no se trate de una variación de brillo propio de la estrella observada. La duración de estos dos acontecimientos, alrededor de un mes, demuestra que la masá del deflector es del orden de una décima de la masa solar. El análisis que se está realizando de las curvas de luz de los millones de estrellas controladas quizás indicará si toda la masa oculta de nuestra galaxia está en forma de enanas marrones. (Según ref. (4) y (5).)*

luz procedente de una estrella más alejada, cuando los dos astros están alineados respecto al observador. En el caso de un alineamiento perfecto, el deflector crea un «anillo de Einstein». Tomando el ejemplo de una estrella de las Nubes de Magallanes (a 170 000 años luz, es decir, más allá del halo, pero suficientemente próxima para poder ser separada de las estrellas vecinas), y un deflector de una masa solar situado a 30 000 años luz de la Tierra, la estrella tendría que aparecer en forma de un anillo luminoso cuyo radio es del orden de los mil millones de kilómetros. Esto corresponde a un ángulo de unos 0,002 segundos de arco, que es totalmente indetectable con nuestros telescopios actuales. En el caso mucho más probable de que no haya un alineamiento perfecto entre la estrella y el deflector, habrá un desdoblamiento de la imagen de la estrella apuntada, que sigue siendo indetectable en nuestro caso, acompañado de una amplificación de la luz de la estrella a la que se apunta. Es esta última firma —la amplificación luminosa— la que podría revelar la existencia de materia oscura.

Se puede demostrar que en cualquier instante, una estrella de las Nubes de Magallanes tiene una probabilidad entre varios millones de experimentar un aumento de luminosidad superior al 30 % (valor correspondiente a un desalineamiento más pequeño que el radio del anillo de Einstein), en el caso de un halo estándar enteramente formado por enanas marrones. En otras palabras, en cada instante una estrella entre varios millones se vuelve más brillante en un 30 %, es decir experimenta un aumento de 0,3 magnitudes. Esta variación es bastante fácil de medir en las estrellas más brillantes que las magnitudes 19 o 20, lo que representa *grosso modo* la magnitud de Sirio si estuviese situado en la Gran Nube de Magallanes. Pero no se había realizado ningún intento, ya que controlar millones de estrellas parecía una tarea imposible. Además, el fenómeno de microlente tiene una cierta duración, ya que las enanas marrones están desde luego en movimiento. Esta duración depende sobre todo de la masa del deflector, y varía entre algunas horas y algunos meses. Cuanto más pequeños son los objetos buscados, más grande es el número de acontecimientos esperados, pero más corta es su duración; inversamente, cuanto más másicos son, el número es menor, pero la duración es mayor. De ahí se desprenden unas consecuencias sobre la estrategia a adoptar en las observaciones.

VIGILAR MILLONES DE ESTRELLAS

La colaboración francesa EROS (de *Expérience de Recherche d'Objects Sombres*) entre astrofísicos y físicos de partículas se lanzó a la carrera de la materia oculta hace ahora tres años.[3] Nos enfrentábamos con el problema de controlar el mayor número posible de estrellas de las Nubes de Magallanes (varios millones, al menos hasta la magnitud 20) alrededor de cada dos días, y un pequeño porcentaje de éstas alrededor de cada quince minutos. Afortunadamente, los franceses tienen acceso al ESO (Observatorio Europeo Austral), instalado en el observatorio de La Silla en Chile (fig. 1). Con el telescopio de tipo Schmidt de un metro de diámetro, se tomaron más de trescientas placas fotográficas de gran campo (5° por 5°) casi todas las noches observables durante los tres veranos australes 1990-1991, 1991-1992 y 1992-1993. El objetivo era detectar los acontecimientos más largos y, por tanto, las enanas marrones más masivas. Además, con un pequeño telescopio de 40 centímetros de diámetro perteneciente al Observatorio de Haute-Provence, equipado con una cámara especialmente construida por el CEA de Saclay que comprende dieciséis elementos CCD (*Charge Coupled Device*) reunidos, se registraron durante los mismos periodos más de 8 500 imágenes de un campo de 1° por 0,4° (hasta cincuenta por noche); en este caso el objetivo eran las enanas marrones menos másicas.

Las dificultades de los dos enfoques son gigantescas, en especial a causa de las enormes cantidades de datos a manipular, a medir y a analizar en unas cadenas de tratamiento que requieren los muy potentes medios informáticos de la física de partículas, y que aquí no es posible describir. Al principio de setiembre de 1993, después de haber analizado alrededor del 40 % de los datos recogidos, nuestra colaboración EROS aislaba en las

(1) A. Einstein, *Science, 84*, 506, 1936.
(2) B. Paczynski, *Astrophys. J., 304*, 1, 1986.
(3) La colaboración EROS asocia al DAPNIA (CEA-Saclay), al Laboratorio del acelerador lineal (CNRS/IN2P3, Orsay), al Instituto de astrofísica de París (CNRS/INSU), al grupo Machine à mesurer pour l'astronomie (INSU), al Observatorio de Marsella y al Laboratorio de astronomía espacial (CNRS).
(4) E. Aubourg *et al., Nature, 365*, 623, 1993.
(5) C. Alcock *et al., Nature, 365*, 621, 1993.
(6) A. Udalski *et al., Acta Astronomica, 43*, 289, 1993.

placas fotográficas dos curvas de luz entre cerca de cuatro millones. Sus características son similares en todos los sentidos, salvo errores de medida, a las predichas para acontecimientos debidos al efecto de lente gravitatoria. En efecto, se constata, en primer lugar, un aumento de luminosidad (alrededor de una magnitud en los dos casos) y, luego, un decrecimiento simétrico con el tiempo. Estas variaciones son parecidas y simultáneas en los dos colores diferentes registrados, el azul y el rojo; en otras palabras, tal como está previsto, el fenómeno no depende de la longitud de onda. Luego, los acontecimientos son únicos, ya que la probabilidad de que una misma estrella sufra dos veces el efecto es despreciable. Finalmente, la estrella tiene la misma magnitud antes y después del fenómeno (fig. 2A). La duración de estos dos acontecimientos es de unos treinta días, lo que corresponde a unas masas de los deflectores del orden de 0,1 masas solares, con una gran incertidumbre a causa de nuestra ignorancia de los parámetros exactos del halo y al número todavía demasiado pequeño de acontecimientos encontrados.[4]

La masa oculta parecía por tanto ponerse al descubierto.

Por supuesto, el desafío científico es tal que la colaboración EROS afronta una aguda competencia internacional. El proyecto norteamericano australiano MACHO (de *Massive Astrophysical Compact Halo Object*) se inició hace un año, sin placas de Schmidt, pero con un telescopio de 1,3 metros de diámetro en el monte Stromlo, en Australia, y con unas cámaras CCD de gran tamaño que registran los dos colores simultáneamente. Este equipo ha anunciado la detección de un acontecimiento compatible con una microlente (fig. 2B). El aumento de luminosidad alcanza dos magnitudes y, también en este caso, dura unos treinta días.[5] Este acontecimiento se ha encontrado además en los datos EROS; nosotros no lo habíamos retenido ya que está en el límite de nuestro poder de detección en el color azul.

Un tercer equipo norteamericano polaco, con el propio B. Paczynski, también busca estos acontecimientos, pero en la dirección del centro de nuestra galaxia. Se trata de la colaboración OGLE (de *Optical Gravitationnal Lensing Experiment*), que observa desde Las Campanas, en Chile. Y también acaba de anunciar la detección de un acontecimiento que correspondería a un objeto de 0,3 masas solares.[6] Así, tres experimentos independientes han detectado el mismo tipo de fenómenos.

¿Está verdaderamente a punto de resolverse el enigma de la masa oculta del halo de nuestra galaxia? ¿Está esta masa oculta en forma de enanas marrones? En el estado actual de los datos, aunque está claro que se ha descubierto un fenómeno nuevo y muy raro, todavía es imposible excluir que se trate de un efecto desconocido hasta ahora y puramente relacionado con la estrella misma (y no con una lente gravitatoria). Serán necesarias observaciones complementarias, en curso, de estrellas candidatas, y la detección de nuevos acontecimientos —los tres equipos EROS, MACHO y OGLE continúan sus observaciones— para afirmar definitivamente que la materia oscura galáctica tiene naturaleza bariónica, y proporcionar una idea de la cantidad de masa que se encuentra en esta forma. Pero se ha demostrado la viabilidad del proyecto inicial, y nadie duda de que la colosal base de datos así constituida tendrá sin duda unas consecuencias astrofísicas insospechadas, por ejemplo en el estudio de las estrellas variables. Si se confirma el descubrimiento de materia oscura bariónica en los halos de las galaxias, se habrá dado un paso fundamental. Faltará, no obstante, comprender cómo se ha formado y si puede dar cuenta por sí sola del conjunto de la masa oculta del Universo.

JEAN-PHILIPPE BEAULIEU, ROGER FERLET, PHILIPPE GRISON Y ALFRED VIDAL-MADJAR

LA OTRA SALIDA AL TEOREMA DE FERMAT

Ha sido el mes de diciembre pasado, después del alboroto producido en el mes de junio por la pretendida demostración del célebre teorema de Fermat dada por el matemático inglés Andrew Wiles, cuando éste «ha acabado por admitir un fallo en su razonamiento».[1] Una decepción más de la larga lista a las que nos tiene acostumbrados la historia de este teorema.

Si por algo son admirables los matemáticos es por su enorme tesón, lo que en este caso no les ha servido aún para el objetivo de demostrar el dichoso teorema de Fermat, aunque sí parece que el esfuerzo ha sido fecundo en la teoría de números. Yo, por mi parte, desde hace tiempo vengo sosteniennndo que el teorema de Fermat es indemostrable por que se trata de un enunciado ilegítimo, pues generaliza lo que no es genérico. Entiendo que cada potencia, reduciéndolas a las de exponente primo, aunque se incluya la cuarta también, constituye un conjunto disjunto de números a excepción del 1, que es común a todas. Hay, pues, un problema de lenguaje, de homonimia, lo que está clarísimo en el «1» inicial de cada potencia.[2] Hay autores como Roger Penrose que, refiriéndose a este teorema, hablan de una familia de problemas, lo que hace imposible su demostración, pues los algoritmos sólo sirven para cada problema, no para la familia de ellos.[3]

Entiendo que el camino que han seguido los matemáticos hasta ahora les ha cerrado la salida, pues los números no son lógicos. Esto no quiere decir que sean absurdos o contradictorios, si no que son ilógicos o paradógicos. En el caso de la tercera potencia es bien evidente. Partiendo de la ecuación de los tres cuadrados, $x^2 = y^2 + z^2$, parece que lo lógico sería que la siguiente fuese $x^3 = y^3 + z^3$. Pero resulta que, según el teorema de Fermat, y según está demostrado, tal ecuación no tiene soluciones enteras. Ante esta situación, los matemáticos, que siguen aferrados al teorema de Fermat, han continuado con la cuarta potencia, con la quinta, con la séptima, etc. Y ahí se han quedado, buscando alguna en la que el teorema no se cumpla o tratando de demostrar que en ninguna se puede cumplir. Y como esto no lo han conseguido aún, ahí continúan, con el rigor pinchándoles las carnes, temerosos de dejar ese teorema en el aire, que sería como dejar un enemigo peligroso a la espalda.

La otra salida que nosotros hemos encontrado es que, si la ecuación de tres cubos no tiene solución, ¿por qué no ir a la de cuatro? Esto no parece muy lógico, pero es muy real, pues ésta sí tiene soluciones: $6^3 = 5^3 + 4^3 + 3^3$. De esta ecuación ya se ocupó Euler (1707-1783), aunque este autor no da soluciones.[4] Más modernamente los autores Hardy y Wright ofrecen una fórmula atribuida a Ramanujan que da muchas soluciones.[5] Hay otras como la de L. Mordell, que es menos eficaz que la Ramanujan.[6] Podía añadir una fórmula ideada por mí mismo y que también da bastantes soluciones.[7]

Todo esto es en el campo de la aritmética, ¿pero qué ocurre en el campo de la geometría? Ahí el capítulo está completamente en blanco, al menos yo no conozco ningún trabajo sobre el tema, a excepción, claro está, de lo que yo mismo he publicado a partir de mi opúsculo *Teorema de los cuatro cubos y ecuación del espacio real* (1974). Y la cuestión de fondo no puede ser más sencilla: ¿por qué, si la ecuación de los tres cuadrados (Teorema de Pitágoras) tiene una interpretación geométrica, no ha de tenerla igualmente la ecuación de los cuatro cubos? ¿No sería ésta la verdadera ecuación del espacio y no la de los cuatro cuadrados que nos da la geometría analítica? Porque ésta propone unas relaciones de naturaleza plana o cuadrática, mientras que la de los cuatro cubos las propone de naturaleza espacial o cúbica. ¿Y no son éstas últimas las que verdaderamente se corresponden a la naturaleza del espacio, que es cúbica y no cuadrática? Claro está que, en este caso, al espacio hay que considerarlo de cuatro dimensiones y no de tres, pues cuatro son los puntos, no en el mismo plano, que determinan un espacio. De esta manera, lo mismo que el triángulo es la figura más simple del plano, el tetraedro será el cuerpo más simple del espacio. De igual suerte, si el teorema de los tres cuadrados se realiza entre tres puntos de la circunferencia, el de los cuatro cubos se realizará entre cuatro puntos de la esfera.

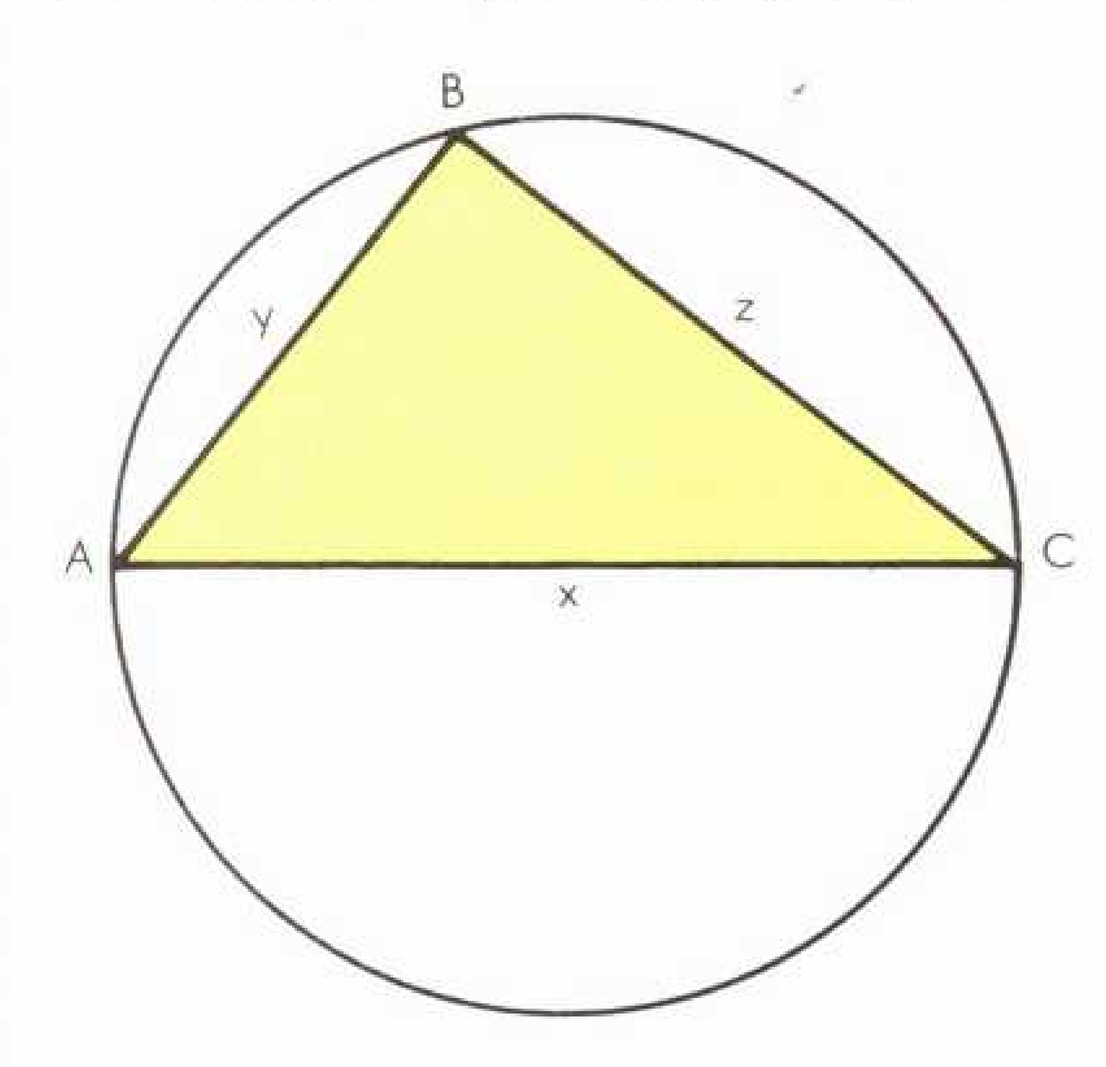


Figura 1. La ecuación de los tres cuadrados, $x^2 = y^2 + z^2$, tiene su expresión geométrica en el plano real, que está determinado por tres puntos no en línea recta, siendo la circunferencia el lugar geométrico donde se produce su realización y el triángulo la figura más simple en la que la ecuación se puede satisfacer, especialmente el rectángulo, que tiene dos de sus vértices coincidiendo con los extremos del diámetro y el tercero con cualquier otro punto de la circunferencia.

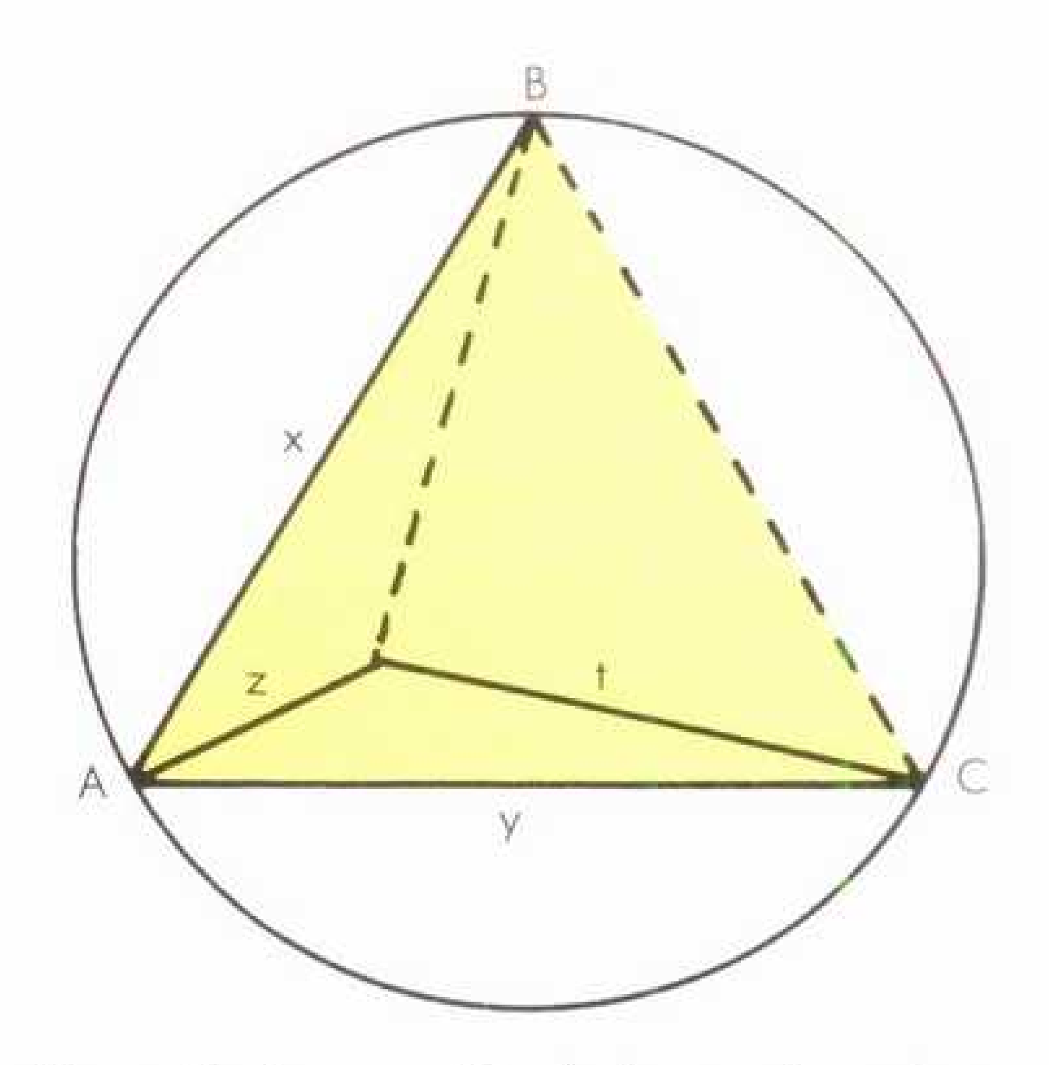


Figura 2. La ecuación de los cuatro cubos, $x^3 = y^3 + z^3 + t^3$, ha de tener su expresión geométrica en el espacio real, que está determinado por cuatro puntos no en el mismo plano, siendo la esfera el lugar geométrico en donde se puede producir su realización y el tetraedro el cuerpo más simple en el que la ecuación se puede satisfacer. Hay, no obstante, una profunda diferencia con lo que ocurre en el plano, pues en el espacio hay una mayor indeterminación.

Sólo me resta decir en esta breve información que, de la larga y no siempre feliz experiencia mía en este terreno, la conclusión a la que he llegado es que la ecuación de los cuatro cubos en el espacio no funciona de una forma tan dócil como la de los tres cuadrados en el plano, lo que no me ha impedido que, combinando aritmética y geometría, haya solucionado, por ejemplo, la ecuación de siete cubos: $16^3 = 13^3 + 11^3 + 7^3 + 6^3 + 2^3 + 1^3$.

Se suele decir que estamos en la era del espacio. Puede que sea cierto, pero no en la de los saberes matemáticos. En éstos, la ciencia del espacio de estancó hacia el año 430 a.C. cuando la pitonisa de Delos enunció el célebre problema de la duplicación del cubo. Posteriormente se le ha dado alguna solución geométrica, pero la geometría del espacio, la verdadera geometría del espacio se estancó allí.

JULIÁN SANZ PASCUAL

(1) El País, 11-12-93, pág. 29.
(2) J. Sanz Pascual, *Primer discurso de ilógica*, Tecnos, Madrid, 1992, pág. 174 y siguientes.
(3) R. Penrose, *La nueva mente del emperador*, Mondadori, Madrid, 1991, pág. 97.
(4) L. Euler, *Intruductio in analysin infinitorum*, Lausanne, 1748, tomo 2, pág. 202.
(5) Hardy y Wright, *An introduction to theory of numbers*, Oxford, 1956, pp. 190-203.
(6) L. Mordell, *Diophantine equations*, Academic Press, Londres, 1969, pág. 100.
(7) Ob. Cit., pág. 167.

L I B R E R Í A D E

FRANCE CAIRNCROSS
LAS CUENTAS DE LA TIERRA
Acento Editorial, 1993

A menudo, los críticos de la protección ambiental destacan el coste que supone proteger el entorno. Nadie mejor que la editora de medio ambiente del seminario británico *The Economist* para rebatir este argumento. En *Las cuentas de la Tierra*, France Cairncross muestra la estrecha relación entre ecología y economía y da unas pautas que interesan tanto a gobernantes como a empresarios.
Sin duda, proteger el medio ambiente tiene un coste, como lo tiene la Seguridad Social, el seguro de desempleo o las vacaciones pagadas. Son conquistas sociales que deben permanecer pese a que quizá sería más económico no tenerlas. La revolución ambiental es el próximo paso. Quizá sería más barato, a corto plazo, no imponer tantas normativas sobre residuos, consumo de energía o contaminación.
Pero a la larga, como demuestra la autora, saldría mucho más caro. Como ella afirma, la empresa que tiene una buena política ambiental suele estar bien gestionada. La empresa que no se preocupa por el medio ambiente suele tener una gestión insatisfactoria.

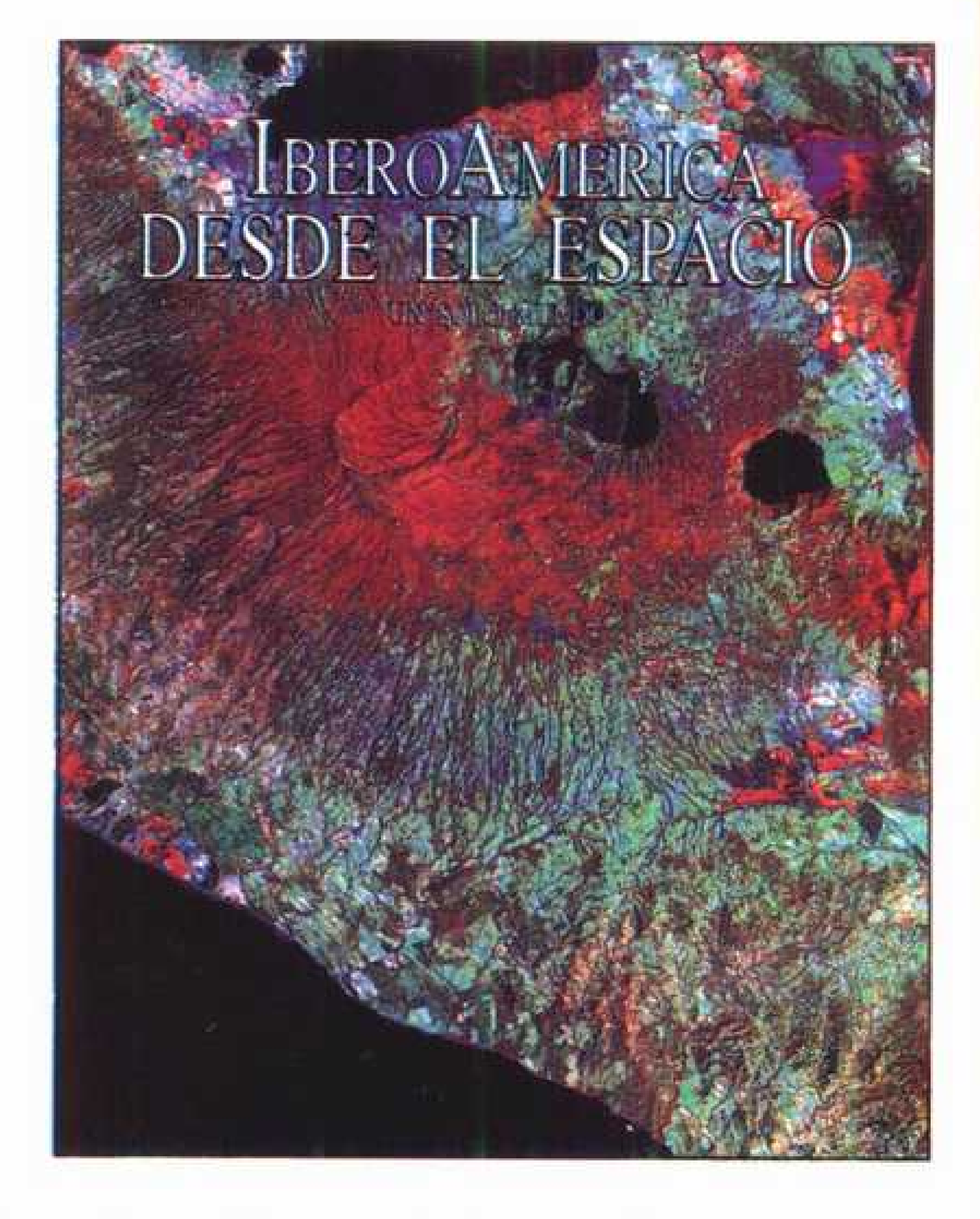
Frances
Cairncross
LAS CUENTAS
DE LA TIERRA
Economía verde y
rentabilidad medioambiental
Acento Editorial
The Economist Books

Establecer el coste de un medio ambiente contaminado o lleno de reiduos no es nada fácil. La autora explica que a menudo las consecuencias de contaminación se producen mucho más tarde y lejos del lugar donde se crea la polución. Pero ello no ha de impedirnos realizar algunas cuentas que demuestran cómo desentenderse del medio ambiente resulta mucho más caro.
La primera parte del libro se refiere a los gobiernos. Cairncross considera que un exceso de normativas es negativo. En siete capítulos muestra las posibles contradicciones en que puede incurrir una política ambiental. Y destaca que muchas veces la solución obvia no es la más apropiada. Todo está tan interrelacionado que a veces resulta difícil establecer si una determinada normativa no es, a la larga, perjudicial.
En la segunda parte, la autora se refiere a las empresas. Comenta el valor y la imagen del producto ecológico, así como la necesidad de estudiar todo un proceso para considerar si se aviene con la protección medioambiental. Y demuestra el beneficio económico que muchas empresas pueden tener si actúan conforme a esta política.
Cairncross cree más en la libertad de las empresas que en las normativas estrictas. Pero también analiza la forma como las empresas conscientes son las más beneficiadas. Con datos objetivos concluye que las empresas no son altruistas por vocación y que serán tan ecológicas como les exijan sus gobiernos. Pero que todos saldrán ganando si comprenden el mutuo interés en la protección ambiental. Temas como la armonización de la normativas ambientales en Europa o la transferencia de tecnología al Tercer Mundo se incluyen en una obra básica para entender la relación coste/beneficio en la protección ambiental. Un libro muy importante para todos los interesados en el tema, pero que habrían de leer sobre todo economistas y dirigentes. Sobre todo, los que aún no entiendan la importancia del medio ambiente.

Xavier Duran.

AUTORES VARIOS
IBEROAMÉRICA DESDE EL ESPACIO
Lunwerg editores, Barcelona, 1993

Espectacular, éste sería el calificativo más apropiado para calificar *Iberoamérica desde el espacio*. Decenas de fotografías tomadas por satélite ilustran el texto. No cabe duda que el poder de la imagen hace que la primera reacción al tener el libro —de muy cuidada impresión— en nuestras manos sea forzosamente el hojear sus páginas y deleitarnos con las privilegiadas fotografías de las exhuberantes tierras iberoamericanas tomadas a vista de pájaro, o mejor dicho, a vista de satélite.
«Las imágenes obtenidas desde las plataformas espaciales —escribe Ángel Arévalo, director del Instituto Geográfico Nacional— concitan hoy un inusitado interés. En ellas podemos contemplar, de una vez la majestuosa cordillera andina. Resulta extraordinariamente aleccionadora la introspección de la Amazonia a la luz de los datos suministrados por sensor espacial. Podemos inmiscuirnos en la soledad del desierto y escuchar su silenciosa voz hasta quedar cautivados en su intimidad».
Será luego, después de haber dado satisfacción al más noble de los sentidos, cuando entremos en el texto escrito y en los diversos croquis morfológicos, de ocupación del suelo, geológicos y otros que acompañan y complementan la información contenida en las fotografías. Porque esta obra tiene la cualidad de ser apta tanto para el especialista amante de la cartogarfía, capaz de volcarse sobre una fotografía varias horas, como para el profano que mira curioso las ciudades y los países aprovechando la perspectiva privilegiada del ojo del satélite.
Se inicia el libro con una explicación breve y clara de las técnicas de observación remota, también conocidas como teledetección, que hacen posible las imágenes (para esta obra



se han seleccionado las tomadas por Landsat y SPOT). Imágenes que pueden recibir un tratamiento digital lo que permite realzar su tonalidad, obtener índices de vegetación, realizar mediciones sobre la imagen, corregir su geometría o abordar su clasificación temática.
Mediante los filtrajes remarcan contrastes espaciales para realzar rasgos lineales como, por ejemplo, carreteras, límites parcelarios, fallas o fracturas en el terreno. La imágenes tratadas digitalmente pueden relacionarse con otras variables para generar mapas sintéticos de aptitud del suelo, riesgo de erosión o incendio, áreas de interés ecológico, etc. En resumen, todo un abanico de posibilidades que hacen aún más atractivo y útil las imágenes obtenidas por satélite. Más de uno puede que se pregunte, ¿a la hora de pergeñar el libro, que fue antes, las imágenes obtenidas por el satélite o su estructuración? Sancho Comins y Emilio Chuvieco, de la Universidad de Alcalá de Henares, responsables de la idea y coordinación técnica del libro responde así: «Ésta no es una obra que reúna, a modo de catálogo, unas imágenes más o menos bellas. El planteamiento temático precedió a la búsqueda de las ilustraciones. Los diversos equipos de trabajo señalaron qué temas debían estar presentes y qué características técnicas convenían más a las imágenes».
Iberoamérica desde el espacio está dividido en tres grandes bloques. a) Escenario natural: de los Pirineos al Estrecho de Magallanes. b) De la ciudad colonial a la gran metrópoli. c) Paisajes agrarios, áreas de interés ecológico y explotaciones mineras. Profesionales de doce países iberoamericanos, España y Portugal han hecho posible esta obra.

Ignacio Bravo.

LAS CIENCIAS

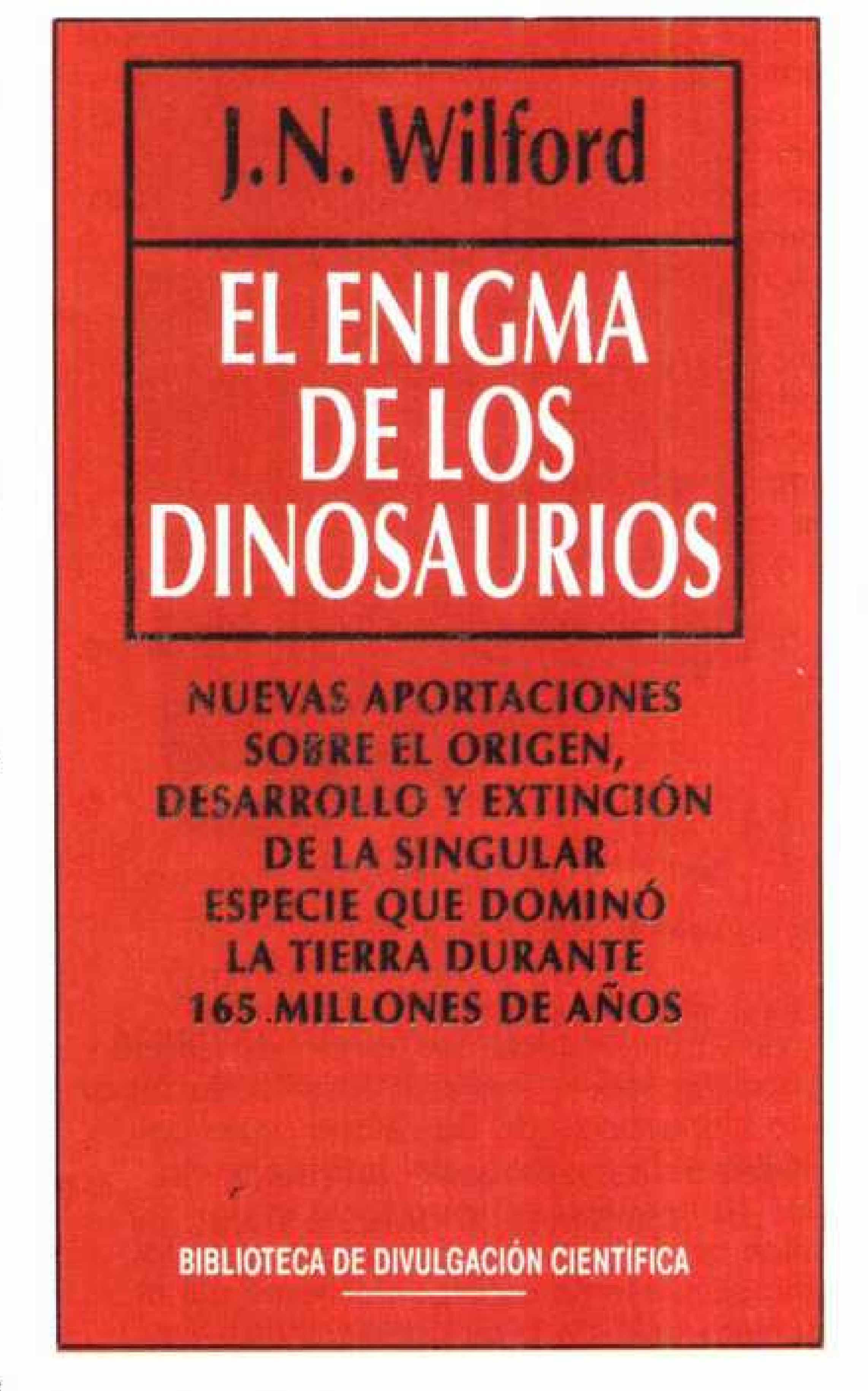
MANUEL ALFONSECA
LA VIDA EN OTROS MUNDOS. A LA BÚSQUEDA DE INTELIGENCIA EXTRATERRESTRE
Serie McGraw-Hill de divulgación científica, McGarw- Hill/Interamericana de España, Madrid, 1993

Afirma Enric Trillas en el prólogo, «no es un libro apto para un lector que busque la respuesta definitiva, que sería una respuesta no científica en el presente estado de conocimientos». *La vida en otros mundos. A la búsqueda de inteligencia extraterrestre* es un libro responsable, como los son todos los de la Serie McGraw-Hill de divulgación científica en donde está incluido, y como lo es Manuel Alfonseca, profesor de la Facultad de Informática de Madrid. No podía ser de otra manera. En esta obra no hay lugar para marcianitos verdes, teorías pseudocientíficas o filosofía barata de ciencia-ficción.
En este libro lo que sí hay es material suficiente para que el propio lector adquiera los conocimientos que le permitan hacerse una idea de la complejidad y de las leyes que rigen el juego de la creación de vida. Luego, si quiere, es libre de especular y desarrollar sus propias conclusiones.
Porque especular es atractivo y Alfonseca lo hace en los dos últimos capítulos, siempre, eso sí, con el corsé de su preparación científica y honestidad intelectual, lo que quiere decir que la especulación también tiene sus reglas.
Alfonseca aborda *La vida en otros mundos* empezando por la vida en nuestro Planeta Azul. «Este libro enfoca la cuestión de la posible existencia de vida en otros mundos desde un punto de vista científico. Comienza por analizar la vida terrestre, la única que conocemos, desde diversos puntos de vista: su estructura, su origen, su evolución...»
Quizá los primeros capítulos sean la parte menos atractiva de la obra pero sí es la más instructiva. Estas páginas guardan las herramientas que nos permiten hipotetizar con lo que es factible y lo que no en el nacimiento de vida en otros mundos.
A la vida en el Sistema Solar dedica Alfonseca el capítulo seis. Después de explorar sus planetas y satélites concluye que sólo dos astros permiten mantener cierta esperanza de vida microscópica: Marte y Titán. En cuanto a la búsqueda de inteligencia extraterrestre, «la conclusión más razonable es que estamos solos en el Sistema Solar».
Después del disgusto al sospechar la soledad en que vivimos aquí, en el Sistema Solar, Alfonseca trata de animarnos, en el inicio del siguiente capítulo, el dedicado a la vida en nuestra galaxia, donde diez mil trillones de estrellas nos hacen concebir la esperanza de que la vida sea posible en elgunos de los planetas que los circundan. Carl Sagan estima que podría haber un millón de planetas habitados por inteligencias extraterrestres. No obstante, Alfonseca se muestra más cauto, mucho más cauto.
De las posibilidades de vida en otras galaxias el autor prefiere no hacer ningún comentario, excepto que al ser las distancias tan enormes siempre será prácticamente imposible establecer contacto con alguien allí.
En cierta ocasión, recuerda Alfonseca, le preguntaron qué probabilidad había de que existiera vida extraterrestre. Su respuesta fue: «El cincuenta por ciento, no existen datos suficientes para suponer que la hay, ni tampoco para afirmar lo contrario». La puerta sigue entreabierta.

Ignacio Bravo.

JOHN N. WILFORD
EL ENIGMA DE LOS DINOSAURIOS
Biblioteca de divulgación científica, RBA editores, Barcelona 1993

No es fácil mantener la atención del lector a lo largo de cuatrocientas páginas. John Noble Wilford lo consigue con una atmósfera de tensión dramática digna de esa historia pletórica de romanticismo que es la aventura de los buscadores de huesos de dinosurio. El nacimiento de la paleontología es uno de los capítulos con más gancho de la historia de la ciencia. Balbuceante e insegura en los inicios, siempre atrevida, su posterior desarrollo ha llegado a implicar a especialistas de los campos más dispares.
En el primer cuarto de siglo XIX, en Inglaterra, comienza la historia oficial de los dinosaurios, con unos restos óseos y de dientes que llegaron a manos del cirujano G.A. Mantell y que serían identificados como pertenecientes a un dinosaurio (así bautizado felizmente en 1841 por el estirado Owen) Costó muchos sinsabores porque no encajaba con la interpretación literal de ciertos pasajes de la Biblia.
Mantell murió solo y lleno de deudas. Por culpa de los fósiles ya apenas ejercía su profesión médica e incluso mujer e hijos le habían abandonado. Y es que la atracción que ejercen los restos de dinosaurio hizo, hace y hará estragos entre los buscadores de fósiles. El libro contiene los suficientes ejemplos que evidencian este singular apasionamiento por unos seres extiguidos misteriosamente hace 65 millones de años y que poblaron la Tierra más de 160 milones de años, todo un éxito evolutivo.
Pero el interés por estos seres no sólo crecía entre los hombres de ciencia. El tirón popular de los dinosaurios quedó bien patente desde su presentación en sociedad, en el Crystal Palace de Londres, en 1854, donde el asombrado público victoriano acudió en masa para «contemplar los monstruos que poblaron la Tierra antes que Noé», hoy hacemos cola para ver Parque Jurásico.
Pero, ¿Qué estaba ocurriendo en Estados Unidos? Pues una de las más enconadas luchas entre paleontólogos —por otra parte nada raras— que han visto los tiempos. Sucedió en el far-west, en Como Bluff, año 1877, Cope y Marsh competían por el control de lo que resultó ser la más rica de



las tumbas de dinosaurios nunca descubierta. Es una historia de traiciones y espionaje, de envidias y sabotaje, que incluía la destrucción de cualquier resto de fósil que no se llevaran del campo de trabajo.
Tampoco faltan los indios —¡vaya película!—, un año antes Cope y otro enamorado de los huesos de dinosaurio, Sternberg, acudieron a Montana. Cuando estaban allí recibieron la noticia de la matanza de las tropas de Custer en Little Big Horn a manos de los sioux. Nada detuvo a nuestros héroes, descargaron sus bártulos y a escavar.
De historias tan pintorescas está lleno el libro y también de historias tristes, como la de Earl Douglass, que después de llenar de dinosaurios el museo Carnegie, en Pittsburgh, propiedad del magnate del acero (en honor a este millonario y a su esposa se bautizaron dos dinosaurios como Diplodocus carnegie y Apatosaurus louisae) la dirección ordenó suspender las excavaciones. Douglas decidió continuarlas esta vez para la universidad de Utah que en pago borró su nombre de las memorias publicadas por la instiución. Douglas murió en 1931 en la

(pasa a la página siguiente)

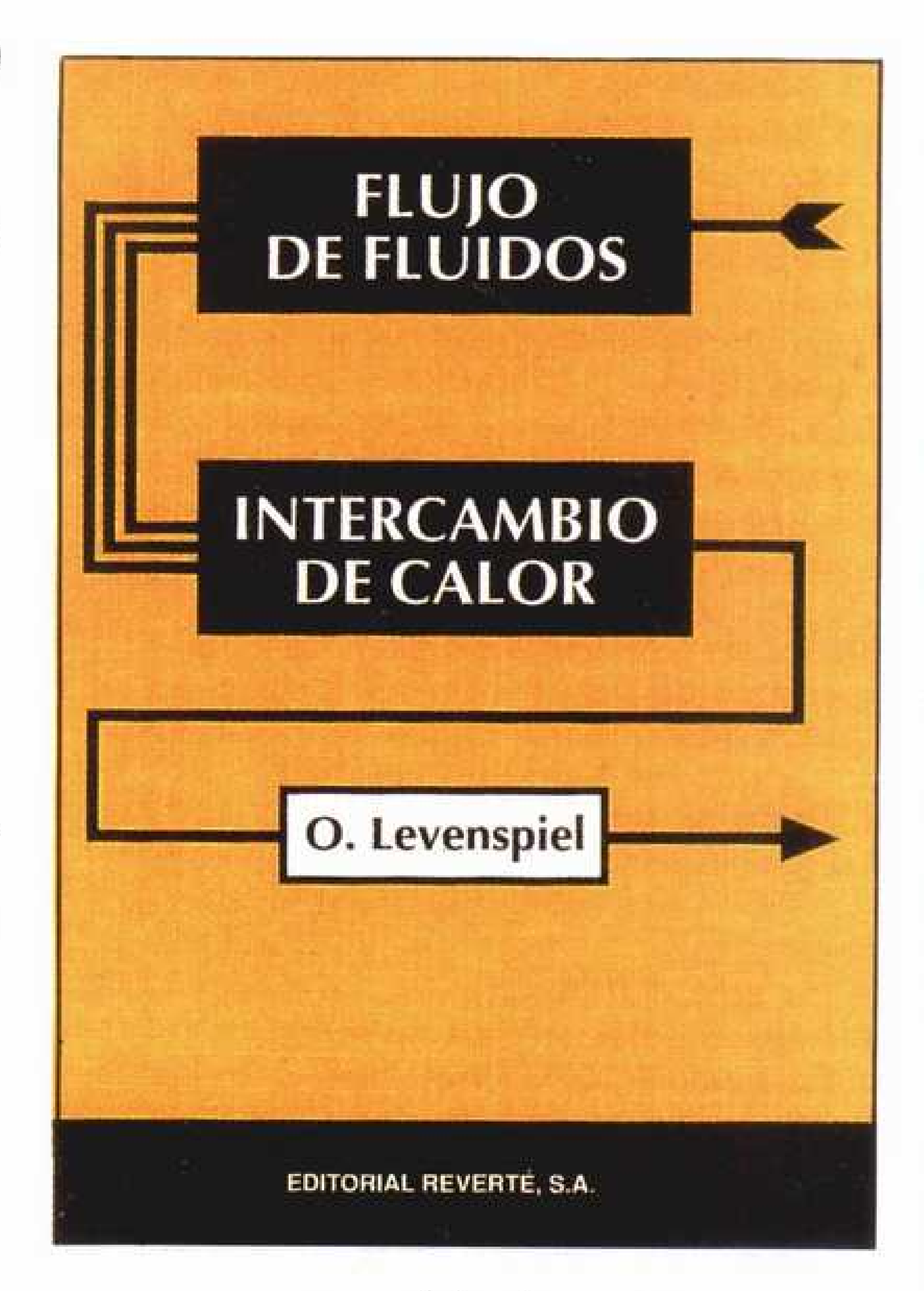
(viene de la página anterior)

pobreza. En Europa nunca faltaron descubrimentos importantes como los Iguanodon encontrados en una mina belga. Pero en el continente africano, el territorio de Tendaguru, fue testigo en 1909 del mayor campamento jamás levantado para buscar fósiles. Bajo la dirección de Werner Janensch, del museo de Berlín, paleontólogos alemanes y cerca de quinientos obreros trabajaron durante cuatro años. Después de la I Guerra Mundial los ingleses ocuparon el lugar de los alemanes. También Estados Unidos montó grandes expediciones fuera de su país. En 1992 eligieron el desierto del Gobi. Cuarenta hombres, cinco vehículos y 75 camellos se adentraron en el hinóspito paraje lleno de peligros, «En muchas ocasiones pasarían por lugares que evidenciaban grandes batallas de las que el mundo exterior no supo nada; montones de cartuchos vacíos, uniformes destrozados...» Después de la época de las grandes exploraciones, de los grandes peligros, de los grandes descubrimientos sobre el terreno viene la época, aunque distinta no menos apasionante, de las grandes teorías sobre la propia vida de los dinosaurios y su extinción. En la tercera parte del libro se reúnen las hipótesis que han conmocionado al mundo científico y a las gentes de la calle también.

Ignacio Bravo.

O. LEVENSPIEL
FLUJO DE FLUIDOS. INTERCAMBIO DE CALOR
Editorial Reverté, Barcelona, 1993

Este libro del profesor O. Levenspiel de la universidad del estado de Oregón y traducido por el profesor José Costa López de la Universidad de Barcelona, trata del transporte de fluidos y del transporte del calor. La temática es importante en la formación de cualquier ingeniero, pero tal como se presenta es especialmente útil al ingeniero químico o al ingeniero de procesos, según la denominación foránea. El libro posee ciertas características, que le apartan del producto típico:
El libro no contiene teoría. Se exponen los principios y el modelo matemático del hecho o fenómeno que se presenta y acto seguido se da la solución, sin perder tiempo ni espacio en demostraciones.
Contiene un capítulo dedicado al transporte de fluidos no newtonianos; tema que aparece generalmente en obras especializadas. Es de agradecer que empiecen a considerarse los fluidos no newtonianos objetos corrientes para que puedan aparecer en las obras de carácter general o más convencional.
Se combinan aspectos de máximo interés para el ingeniero químico, con otros de más interés para el ingeniero mecánico, lo cual hace el libro útil para las dos especialidades de ingeniería. El libro contiene una interesante y original colección de problemas, con temas, aparentemente alejados de la temática de ingeniería, pero que confieren originalidad y amenidad a la obra. De la misma forma que se han destacado los aspectos que pueden considerarse positivos, hay que mencionar



que se encuentra a faltar la temática relacionada con el cambio de estado. La ebullición, la evaporación y la condensación son indispensables en una visión general, incluso introductoriá, de la transmisión de calor (recordemos la importancia que tienen las calderas, evaporadores, condensadores, concentradores, torres de refrigeración, etc.)
Sin embargo, hay un capítulo dedicado a los intercambiadores de contacto directo gas-sólido y otro de contacto directo con almacenamiento de calor mediante una carga de sólidos que constituyen un acierto indiscutible. Daremos a continuación una visión general de la obra indicando, no los capítulos, sino los temas a grandes rasgos, que se desarrollan en cada parte.
Parte I: flujo de fluidos: flujo de fluidos newtonianos, flujo comprensible de gases, flujo molecular, fluidos no newtonianos, flujo de partículas sólidas a través de un fluido, flujo a través de lechos.
Parte II: Intercambio de calor: conducción, convección y radiación, calentamiento y enfriamiento de un sólido en régimen no estacionario, intercambiadores de calor sin contacto directo, intercambiadores de calor con contacto directo.
Es evidente que teniendo en cuenta las características del libro es recomendable y útil a un amplio sector de estudiantes y profesionales, en el ámbito de la ingeniería mecánica y química.

A.L. Miranda.

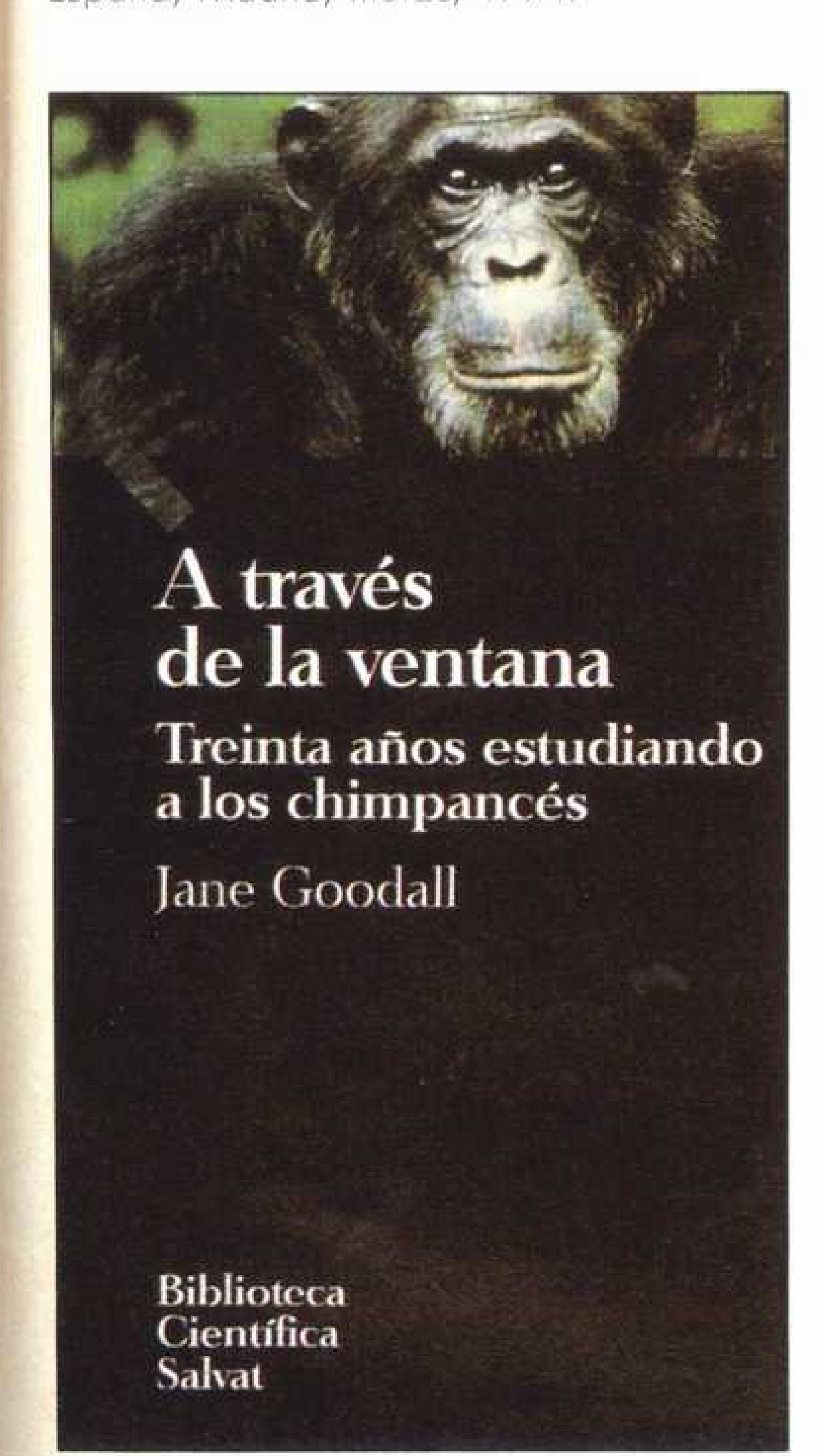
PAUL KENNEDY
HACIA EL SIGLO XXI
Plaza & Janés, Barcelona 1993

En los análisis sobre la situación mundial y la forma como puede evolucionar en las próximas décadas se echan a faltar visiones verdaderamente globales, que tengan en cuenta no sólo aspectos políticos y económicos, sinó también sociales, tecnológicos, educativos y ambientales. Por ello, resulta agradable leer un libro como el que ha publicado Paul Kennedy, catedrático de historia en la universidad de Yale. Autor de un libro que tuvo una gran acogida, *Auge y caída de las grandes potencias*, recogió el comentario de un economista, quien decía encontrar a faltar en aquella obra análisis sobre el cambio climático, el crecimiento demográfico o el impacto de la tecnología.
Desde aquel momento, Kennedy empezó a recoger información sobre temas como el efecto invernadero o la ingeniería genética. Fruto de la recogida de información y la reflexión es esta obra. En la primera parte, el autor describe las tendencias generales en demografía, biotecnología, robótica y medio ambiente, así como sobre el futuro de los actuales Estados-nación. Esta parte sirve al lector poco conocedor de estos temas para entender las líneas generales. El autor ya informado sobre el efecto invernadero o el crecimiento demográfico hallará también detalles de interés. Así, resulta muy llamativo, sobre todo en estos momentos, el capítulo sobre la robótica y la automatización del trabajo, por su relación con el empleo y la industria.
En la segunda parte, Kennedy realiza el trabajo más difícil. Se trata de analizar la situación actual y su posible evolución en el próximo siglo de diversas regiones del planeta. Así, analiza minuciosamente Japón, China e India, Europa, el mundo subdesarrollado, la antigua URSS y Estados Unidos. Kennedy parte de diversas evidencias —el sistema educativo, la industrialización, la evolución demográfica, el equilibrio comercial, la capacidad de innovar, la manera como puede afectar a cada uno el cambio climático— para establecer un posible escenario en el siglo XXI.
De esta forma, con un estilo que proporciona mucha información sin que el lector encuentre una escritura muy densa, Kennedy nos dibuja el próximo siglo. No se trata de establecer pronósticos concretos, lo cual sería absurdo y arriesgado. Se trata de analizar por dónde puede ir el planeta en la próxima centuria, teniendo en cuenta el máximo de espectos. Así, vemos que el sistema educativo japonés y la baja demografía de aquel país, así como su capacidad para invertir en los sectores más innovadores le ha llevado a una posición de privilegio. Pero que depende de la actitud que tomen los restantes países con los productos japoneses que el imperio del sol naciente siga o no en esta posición. Vemos que América Latina y el África subsahariana —sobre todo ésta última— son las preocupantes, en gran parte por la actitud de occidente. Y que India puede ser el país más poblado del mundo en el próximo siglo, al mismo tiempo que debe hacer frente a una enorme desigualdad entre sus ciudadanos.
Hacia el siglo XXI es un libro para entender la situación mundial y su posible evolución sin centrarse, como suele pasar entre los intelectuales, sólo en ciertos aspectos. El planeta necesita aportaciones como la de Paul Kennedy, visiones que no minimicen el impacto de la tecnología, el sistema educativo, la demografía o el medio ambiente. En definitiva, visiones auténticamente globales.

Xavier Duran.

CIENCIAS

- **Ciencia, consumo y otras cosas,** M. Luis Casalderrey, Ediciós do Castro, La Coruña, 1993.
- **Selección de obras Luís Mariano Vidal (1842-1922),** Museu de Geologia, Ajuntament de Barcelona, Barcelona, 1993.
- **Las arrugas en el tiempo,** George Smoot, Plaza y Janés, Barcelona, 1993.
- **La explosión demográfica. El principal problema ecológico,** Paul R. Ehrlich y Anne H. Ehrlich, Salvat, Barcelona, 1993.
- **Guía de la Tierra y del Espacio,** Isaac Asimov, Ariel, Barcelona, 1993.
- **Parasitología molecular,** Luis Rivas y Manuel Carlos López (coordinadores), CSIC, Madrid, 1993.
- **The nearest active galaxies,** John Beckman, Luis Codina y Hagai Netzer, CSIC, Madrid, 1993.
- **Avances en ingeniería genética,** Miguel Vicente (coordinador), CSIC, Madrid, 1993.
- **Chip,** n° 144, VNU Business Publications España, Madrid, marzo, 1994.



- **Integral,** n° 171, Edita Oasis, Barcelona, marzo, 1994.
- **Materiales y procesos avanzados,** Francisco Javier Melero, CSIC, Madird, 1993.
- **Proyecto 2000,** n° 90, Ingeniería del diseño y desarrollo de los productos, Pulsar, Barcelona, marzo-abril, 1994.
- **Le Courrier de l'Unesco,** Éditions Hors Siège, París, marzo, 1994.
- **Ibérica,** n° 362, Revista de actualidad electrónica, Revista de la Asociación de Pedagogía de las ciencias, Barcelona, marzo, 1994.
- **PC World,** n° 97, La revista de los usuarios de los ordenadores personales y compatibles, IDG Communications, Madrid, marzo, 1994.
- **Help 400,** n° 17, Revista para el profesional de los S/3X y AS/400, Edita B2G, Barcelona, marzo, 1994.
- **Novamaquina 2000,** n° 205, Pulsar S.A., Barcelona, marzo, 1994.
- **Tecno 2000,** n° 61, Fundació Catalana per a la Recerca, Barcelona, marzo, 1994.
- **Mundo Electrónico,** n° 247, Boixareu Editores, Barcelona, marzo, 1994.
- **Política Científica,** n° 63, Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, Madrid, marzo, 1994.
- **Cosmos,** n° 16, KST Ediciones, Gandía, marzo, 1994.
- **RTV,** n° 55, Magazine de los mercados audiovisuales, Showpress, Barcelona, marzo, 1994.
- **SNE,** n° 129, Revista de la Asociación Nuclear Española, Madrid, marzo, 1994.
- **Ecología,** n° 23, Calendra, Madrid, marzo, 1994.
- **L'Historie,** n° 175, Société D'Editions Scientifiques, París, marzo, 1994.
- **Noticias,** n° 49, Instituto de Astrofísica de Canarias, Barcelona, marzo, 1994.
- **Natura,** n° 128, G+J España, Madrid, marzo, 1994.

C O L O Q U I O S

1-4 MARZO *MADRID (ESPAÑA)*
SICUR. Salón internacional de la seguridad.
Ifema. Parque Ferial Juan Carlos I. Apdo. Correos 67067. 28067 Madrid. Tel. (91) 722 50 00. Fax (91) 722 57 99.

2-4 MARZO *BARCELONA (ESPAÑA)*
III Curso internacional sobre cirugía de la calvicie.
Srta. Silvia. Instituto Dexeus. Iradier, 3. Tel. (93) 204 78 11. Fax (93) 280 61 07.

2-5 MARZO *VALENCIA (ESPAÑA)*
Marca. Feria del rótulo, señalética y serigrafía aplicada.
Feria Muestrario Internacional. Avda. de la Ferias s/n. Apdo. 476. 46080 Valencia. Tel. (96) 386 11 00.

4-5 MARZO *ORLANDO (FLORIDA)*
IX Reunión anual de la Academy of Osseointegration.
Academy of Osseointegration. 401-N-Michigan. Avenue Chicago (Illinois). Tel. 606 114 267.

4-6 MARZO *ZARAGOZA (ESPAÑA)*
SEDMA. Salón Europeo del deporte de montaña, aventura y ocio.
Feria de Zaragoza. Carretera Nacional II, Km. 311. 50012 Zaragoza.

7-9 MARZO *BARCELONA (ESPAÑA)*
Proyecto ingeniería del proyecto. Curso de ingeniería de compras.
Secretaría de Dep. de Proyectos de Ingeniería. ETS Enginyers Industrials de Barcelona. Avda. Diagonal 647, planta 10. 08028 Barcelona. Tel. (93) 401 66 47. Fax (93) 334 02 55.

7-11 MARZO *MADRID (ESPAÑA)*
II Curso sobre contaminación por efluentes líquidos industriales y urbanos.
Fundación Gómez-Pardo. Dpto. de formación permanente. C/ Alenza 1. 28003 Madrid. Tel. (91) 441 79 21/442 26 56. Fax (91) 442 95 29.

8 MARZO *BARCELONA (ESPAÑA)*
Conferencia sobre la incontinencia urinaria.
Dr. Narciso Serrallach i Milá. Clínica Quirón. Avda. Mare de Déu de Monserrat, 5-11. Tel. (93) 285 00 00.

8-10 MARZO *SEVILLA (ESPAÑA)*
Eurohospital. Feria europea del equipamiento hospitalario.
Feria de muestras iberoamericana de Sevilla. Palacio de exposiciones y congresos (Sevilla-Este). 41007 Sevilla.



9 MARZO *BARCELONA (ESPAÑA)*
Conferencia sobre las novedades en anticoncepción.
Dra. Francisca Martínez San Andrés. Instituto Dexeus. Dpto. Relaciones Públicas. C/ Calatrava 83. 08017 Barcelona. Tel. (93) 418 00 00. Fax (93) 211 16 54.

11-14 MARZO *MADRID (ESPAÑA)*
Expo/Óptica. Salón internacional de óptica, optometría y audiología.
Ifema. Parque ferial Juan Carlos I. Apdo. Correos 67067. 28067 Madrid. Tel. (91) 722 50 00. Fax (91) 722 57 99.

12-13 MARZO *BARCELONA (ESPAÑA)*
Educación ambiental: El mundo rural.
ICHN. Sra. Isabel Munujos. C/ Carme 47. 08001 Barcelona. Tel. (93) 318 55 16. Fax (93) 412 29 94.

14-16 MARZO *MADRID (ESPAÑA)*
Curso sobre combustión controlada de residuos.
Instituto de estudios de la energía. Avda. Complutense 22. 28040 Madrid. Tel. (91) 346 67 21. Fax (91) 346 60 05.

15 MARZO *BARCELONA (ESPAÑA)*
Conferencia sobre los nuevos aspectos diagnósticos y terapéuticos en el cáncer de próstata.
Dr. Baldomero Quintanilla Muñoz. Clínica Quirón. Avda. Mare de Déu de Monserrat, 5-11. Tel. (93) 285 00 00.

15-16 MARZO *MADRID (ESPAÑA)*
III Conferencia internacional sobre empresa y tecnología de la información.
Grupo Planner. Príncipe de Vergara 31, 5°. 28001 Madrid. Tel. (91) 577 47 97. Fax (91) 575 65 10.

15-19 MARZO *MADRID (ESPAÑA)*
LIBER. Salón internacional del libro.
Ifema. Parque Ferial Juan Carlos I. 28067 Madrid. Tel. (91) 722 50 00.

17-19 MARZO *BARCELONA (ESPAÑA)*
Curso sobre diagnóstico prenatal.
Instituto Universitario Dexeus. Pg. Bonanova 67-C/ Calatrava 83. 08017 Barcelona. Tel. (93) 227 47 47.

21-24 MARZO *BARCELONA (ESPAÑA)*
Progama ingeniería del proyecto. Curso de ingeniería legal.
Secretaría del departamento de Proyectos de Ingeniería. ETS Enginyers Industrials de Barcelona. Avda. Diagonal 647, Planta 10. 08028 Barcelona. Tel. (93) 401 66 47. Fax (93) 334 02 55.

23-25 MARZO *SEVILLA (ESPAÑA)*
II Congreso Andaluz de educación ambiental.
ECO-21. Apdo. Correos 4171. 41080 Sevilla. Tel. (95) 492 21 31. Fax (95) 492 45 84.

24-26 MARZO *BARCELONA (ESPAÑA)*
Curso de postgrado internacional de traumatología maxilofacial.
Ultramar Congress. Diputación 238, 3°. 08007 Barcelona. Tel. (93) 412 67 00. Fax (93) 412 03 19.

27 MARZO-3 ABRIL *SALAMANCA (ESPAÑA)*
Curso de iniciación a la ecología marina y terrestre CIEMT'94.
INICE. Apdo. Correos 82. 37080 Salamanca. Tel. (923) 26 45 39.

6 ABRIL *BARCELONA (ESPAÑA)*
Conferencia sobre el tratamiento de infecciones urinarias. Dr. Luís Ibarz Servio y Fco. Javier Ruíz Marcellán.
Instituto Dexeus. Dpto. de Relaciones Públicas. C/ Calatrava 83. 08017 Barcelona. Tel. (93) 418 00 00.

7-9 ABRIL *BARCELONA (ESPAÑA)*
Curso sobre monitorización biofísica fetal.
Instituto Universitario Dexeus. Pg. Bonanova 67-C/ Calatrava 83. 08017 Barcelona. Tel. (93) 227 47 47.

MUNDO CIENTIFICO LA RECHERCHE, *versión en castellano*

Para una información adicional

MUNDO CIENTÍFICO

ICYT (CSIC)

- El Instituto de Información y Documentación en Ciencia y Tecnología (ICYT) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y Mundo Científico ofrecen a los lectores interesados información bibliográfica complementaria de determinados artículos publicados en este número de Mundo Científico.

- Estas bibliografías (sólo en inglés) se obtienen mediante la exploración de las bases de datos bibliográficas adecuadas accesibles desde el ICYT, y se encuentran a disposición del interesado en el ICYT al precio de 3.000.- Pts.

Descuento del 50% a los suscriptores de Mundo Científico (1.500 Pts.).

CUPÓN DE PEDIDO

- ☐ *Los anillos de Neptuno..........3 000 pts.*
- ☐ *El enfriamiento de los átomos por láser............................3 000 pts.*
- ☐ *La producción de oxígeno en las plantas ....3 000 pts.*

Marque con una X los temas de las bibliografías que le interesen

Nombre ....

Dirección Postal ....

C.P. .... Municipio ....

Provincia...

Número de suscriptor a Mundo Científico

....

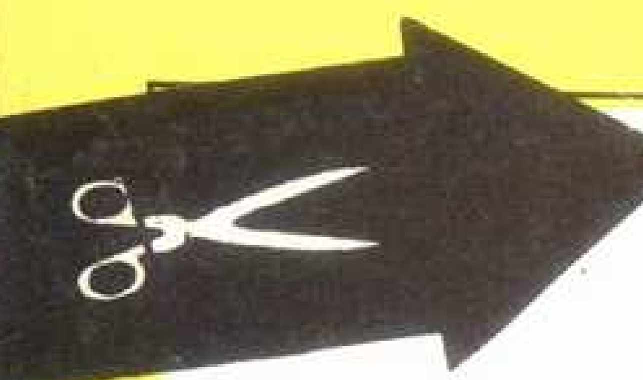
Copie o recorte este cupón y envíelo acompañado de talón bancario, nominal al ICYT, o de giro postal por valor de las bibliografías solicitadas.

ICYT - Consultas Bibliográficas
C/ Joaquim Costa, 22
28002 Madrid
Télex: 22628 CIDMD/E
Teléfono: (91) 563 54 82

SUMMARY Nº 144

SUSCRIBASE A MUNDO CIENTIFICO

LA RECHERCHE, *versión en castellano*



BOLETÍN DE SUSCRIPCIÓN

MUNDO CIENTÍFICO

Copie o recorte este cupón y envíelo a:
EDITORIAL FONTALBA, S.A.
Valencia 359, 6º 1ª
08009 Barcelona (España)

Señores: Deseo suscribirme a la revista **MUNDO CIENTÍFICO**, de periodicidad mensual, al precio de oferta de 6.475 ptas., incluido IVA (7.150 ptas. precio venta quiosco), por el período de un año (11 números) y renovaciones hasta nuevo aviso, cuyo pago efectuaré mediante:

A partir del mes de .... (incluido)

- ☐ Domiciliación bancaria.
- ☐ Envío cheque bancario por 6.475 ptas.
- ☐ Contrarrembolso.

Si desean factura, indiquen el número de copias y el NIF ....

Nombre ....
Apellidos ....
Profesión ....
Domicilio ....
Población ....
Provincia .... Código Postal ....
País .... Teléfono ....
Fecha ....

Para Canarias, Ceuta y Melilla 6.286 ptas. (exento IVA). Envío aéreo Canarias: 6.946 ptas.
Para el extranjero, enviar adjunto un cheque en dólares:

	Ordinario	Avión
Europa	64$	92$
América	64$	109$

(Se recomienda para Canarias y América el envío aéreo.)
Rogamos a los suscriptores que en toda la correspondencia (cambio de domicilio, etc.) indiquen el número de suscriptor, o adjunten la etiqueta de envío de la revista.

DOMICILIACIÓN BANCARIA

C.C.C. (Código Cuenta Cliente)

Entidad | Oficina | DC | Nº cuenta

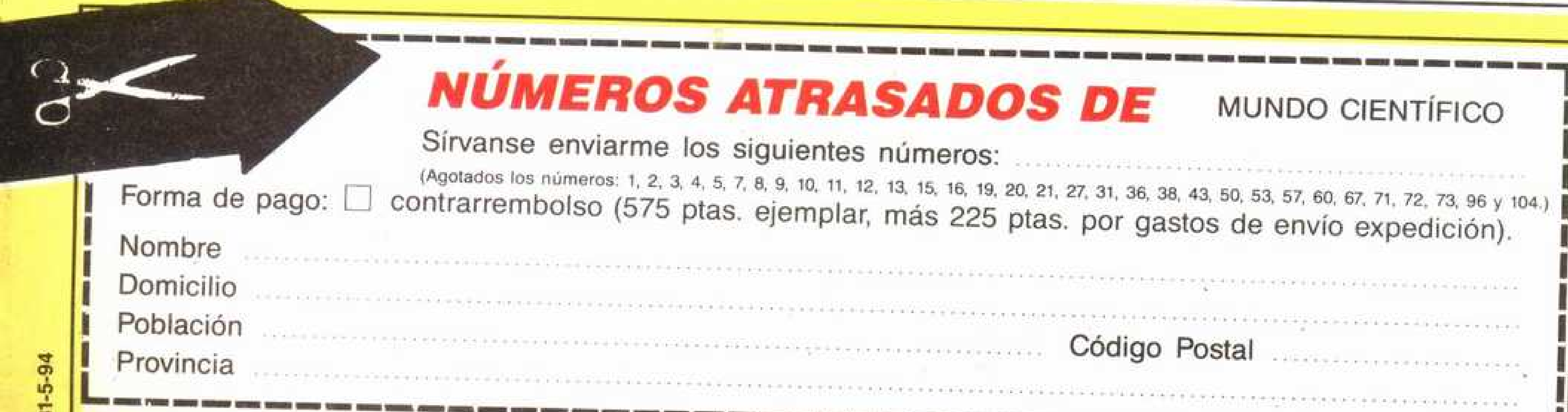
Fecha ....

NOTA IMPORTANTE: **Las diez cifras del número de cuenta deben llenarse todas**. Si tiene alguna duda en el número de cuenta, el banco o la sucursal, consulte a su entidad bancaria donde le informarán.

Banco o Caja .... Sucursal ....
Domicilio ....
Población .... C.P. .... Provincia ....

Señores: Ruego que hasta nuevo aviso abonen a Editorial Fontalba, S.A., Valencia 359, 6º 1ª, 08009 Barcelona (España), con cargo a mi c/c o libreta de ahorros, los recibos correspondientes a la suscripción o renovación de la revista **MUNDO CIENTÍFICO**.

Titular .... Firma
Domicilio ....
Población .... C.P. ....
Provincia ....



NÚMEROS ATRASADOS DE

MUNDO CIENTÍFICO

Sírvanse enviarme los siguientes números: ....

(Agotados los números: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 19, 20, 21, 27, 31, 36, 38, 43, 50, 53, 57, 60, 67, 71, 72, 73, 96 y 104.)

Forma de pago: ☐ contrarrembolso (575 ptas. ejemplar, más 225 ptas. por gastos de envío expedición).

Nombre ....
Domicilio ....
Población ....
Provincia .... Código Postal ....

31-5-94

MUNDO CIENTIFICO

● DIRECTOR
José Gili Casals

● COMITÉ DE REDACCIÓN
Jerónimo Lorente
Mercé Durfort
Martí Llorens
Joan Izquierdo

● REDACCIÓN
Martí Llorens
Ofelia Favarón
Manuel López Naval
Natalia Gili

● PRODUCCIÓN
Mercedes Ruiz-Larrea

LA RECHERCHE

● DIRECTOR GENERAL
Stéphane Khémis

● COMITÉ CIENTÍFICO
Marc Augé
Claude Cohen-Tannoudji
Vincent Courtillot
Jean-Gabriel Ganascia
Marc Jeannerod
Jean-Claude Lehmann
Jean-Marie Lehn
Claude Lorius
Luc Montagnier
Alain Omont

● DIRECTOR CIENTÍFICO
Gabriel Gachelin

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN
El tic-tac del reloj de arena; Los peces de las grandes profundidades; ¿El genoma humano balizado por microsatélites; Los archivos glaciares de Groenlandia: *Joan Pericay*; La producción de oxígeno por las plantas; El cáncer, ¿un problema de comunicación?; ¿Un segundo receptor para el virus del sida?; Las elicitinas, aliadas de las plantas contra los parásitos; Activar la inmunidad para combatir el cáncer: *Jaume Gavaldà*; Antes de los primeros pasos: los orígenes del bipedismo; ¿Se levanta por fin el velo de la masa oculta?; ¿VLA 1623, una estrella bebé de menos de diez mil años?; El enfriamiento de átomos por láser; ¿Meteoritos procedentes de otros sistemas solares?; Los anillos de Neptuno: *Amadeu Montoto*.

EDITA
EDITORIAL FONTALBA, S.A
Valencia 359, 6º 1ª
08009 Barcelona (España)
Tel. (93) 458 55 08. Fax. (93) 458 66 02

SUSCRIPCIONES
Isabel Albareda, Gemma Valls, Marisol López
Valencia 359, 6º 1ª
08009 Barcelona
Tel. (93) 458 55 08. Fax. (93) 458 66 02
Horario: 9 a 14 horas (lunes a viernes)

PUBLICIDAD
Directora de publicidad
Sofía Seiferheld
Valencia 359, 6º 1ª
08009 Barcelona
Tel. (93) 458 55 08. Fax. (93) 458 66 02

PROMOCIÓN SUSCRIPCIONES
Jefes de zona
Amparo Álvarez Iranzo
Luis A. Griffo

Distribución **Marco Ibérica, S.A.**

Fotocomposición:
Marta Casóliva, Montserrat Altimira, Montse Martin
Impresión: Litografía Rosés, S.A.
Barcelona (España)

El precio para Canarias, el mismo de la portada incluida sobretasa aérea.

MUNDO CIENTIFICO próximo número

LA RECHERCHE, *versión en castellano*





La revista científica de ámbito internacional

LA INACTIVACIÓN DEL CROMOSOMA X,
por N. Brockdorff.

LA TECTÓNICA DE VENUS,
por R.J. Phillips.

EL MAGNETISMO MOLECULAR,
por O. Kahn.

LA FÍSICA EN EL TERCER REICH,
por M. Walker.

¿PUEDEN LIMITARSE LOS RIESGOS EN EL PROGRAMA GENOMA HUMANO?,
declaraciones de Alain Pompidou recogidas por Gabriel Gachelin.